ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Konstrukční návrh výškového kormidla malého sportovního letadla

A Small Sport Aircraft Elevator Design

2017 Marek Janout

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janout** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **397222**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**

Studijní program: **Strojírenství**

Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Konstrukční návrh výškového kormidla malého sportovního letadla

Název bakalářské práce anglicky:

A Small Sport Aircraft Elevator Design

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:
1) Konstrukční návrh výškového kormidla
2) Stanovení zatížení výškového kormidla
3) Dimenzování základních konstrukčních prvků kormidla
4) Hmotový rozbor navrženého výškového kormidla

Seznam doporučené literatury:

- Mikula, J.: Konstrukce a projektování letadel II, ČVUT v Praze, 2005
- ŠPUNDA, J.: Stavebná mechanika a pevnost letadel, Požadavky pro dosažení letové způsobilosti podle pevnostních předpisů a výpočet zatížení letounu a jeho částí, skripta VAAZ, 1961
- ŠPUNDA, J.: Stavebná mechanika a pevnost letounu, Část VI, skripta VAAZ, 1971
- ŠPUNDA, J.: Pevnost leteckých konstrukcí: Nosná soustava - křídla letounu, VAAZ, 1955
- Stavební předpis UL-2, LAA ČR

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Brabec Ph.D., ústav letadlové techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce	Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Anotační list

Jméno autora:	Marek JANOUT
Název bakalářské práce:	Konstrukční návrh výškového kormidla malého sportovního letadla A Small Sport Aircraft Elevator Design
Zadavatel:	ČVUT v Praze
Rok:	2017
Obor studia:	Strojírenství – Konstruování podporované počítačem
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Bibliografické údaje:

Počet stran	43
Počet obrázků	12
Počet tabulek	9
Počet grafů	14
Počet příloh	1

Klíčová slova:	ultralehký letoun, výškové kormidlo, předpis UL 2, dimenzování, konstrukce, letová obálka, zatížení
Keywords:	ultralight airplane, elevator, regulation UL 2, proportioning, design, load

Anotace: Bakalářská práce je zaměřena na problematiku výškového kormidla ultralehkého letounu řízeného aerodynamicky. Práce se věnuje samotnému konstrukčnímu návrhu výškového kormidla, stanovení zatížení, dimenzování základních konstrukčních prvků a hmotovému rozboru navrženého výškového kormidla.

Abstract: The bachelor thesis is focused on the issue of the aerodynamical controlled ultralight airplane elevator. The thesis is devoted to the design of the elevator, the load, the design of the basic structural elements and the mass analysis of the designed elevator.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Konstrukční návrh výškového kormidla malého sportovního letadla“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze literární prameny uvedené v přiloženém seznamu.
Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Praze dne 6. 8. 2017 ……..……..

Marek Janout

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za vstřícný přístup a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Rovněž děkuji dalším pedagogům Českého vysokého učení technického za jejich výuku, poskytnutí cenných informací a za předání zkušeností, díky kterým jsem mohl zpracovat tuto bakalářskou práci.

Obsah:

Seznam obrázků 3
Seznam tabulek 3
Seznam grafů 3
Seznam příloh 3
Seznam použitých zkratek 4
Seznam použitých symbolů 4
Seznam použitých programů 4
1. **Úvod** 5
2. **Konstrukční návrh výškového kormidla** 6
2.1 Výškové kormidlo - popis 6
2.1.1 Konstrukce nosníku, žebra a potahu 7
2.1.2 Konstrukce závěsů 8
3. **Zatížení výškového kormidla** 9
3.1 Požadavky předpisů 9
3.2 Letová obálka 10
3.2.1 Obratová obálka 10
3.2.2 Poryvová obálka 12
3.2.3 Klapková obálka 14
3.2.4 Souhrn všech výsledných návrhových rychlostí a násobků 15
3.2.5 Letová obálka 16
3.3 Vyvažovací zatížení vodorovné ocasní plochy 17
3.4 Obratová zatížení 19
3.4.1 Zatížení vodorovných ocasních ploch 19
3.4.2 Zatížení pro případ vychýlení kormidla 20
3.5 Poryvové zatížení vodorovné ocasní plochy 25
3.5.1 Případ změny úhlu náběhu - poryv 26
3.6 Souhrn provozních zatížení VK 30
4. **Dimenzování základních konstrukčních prvků kormidla** 31
4.1 Výpočet polohy elastické osy dvoudutinové konstrukce 32
4.1.1 Kroutící moment k elastické ose 33
4.2 Přerozdělení zatížení v konstrukci – Smykové toky 34
4.3 Kontrola potahu 35
4.4 Návrh pásnic a stojiny 36
4.4.1 Kontrola pásnic nosníku 37
4.4.2 Kontrola stojiny 37
4.5 Souhrn vypočtených rezerv výškového kormidla 38

5. **Hmotový rozbor navrženého výškového kormidla** 39
5.1 Hmotnost prvků 39
5.1.1 Hlavní nosník 39
5.1.2 Potah 39
5.1.3 Žebra 39
5.1.4 Lepené spoje 40
5.2 Polohy těžiště 41
5.3 Souhrn hmotového rozboru letounu 41
6. **Závěr** 42

Seznam obrázků

Obrázek č. 1	Model výškového kormidla	6
Obrázek č. 2	Schéma výškového kormidla s popsanými základními parametry	7
Obrázek č. 3	Princip funkce závěsu výškového kormidla a stabilizátoru	8
Obrázek č. 4	Schéma možného řešení závěsů pro navržené výškové kormidlo	8
Obrázek č. 5	Zatěžující obrazec pro případ vychýlení kormidla	19
Obrázek č. 6	Zatěžující obrazec pro případ změny úhlu náběhu	19
Obrázek č. 7	Schéma zatížení výškového kormidla s reakcí v závěsech	22
Obrázek č. 8	Schéma působení kroutícího momentu na ose otáčení	24
Obrázek č. 9	Geometrická charakteristika kořenu výškového kormidla	31
Obrázek č. 10	Rozložení smykových toků v potahu výškového kormidla	32
Obrázek č. 11	Kroutící moment vzhledem k poloze elastické osy	34
Obrázek č. 12	Schéma navržené konstrukce VK s vyšrafovanými plochami k lepení	40

Seznam tabulek

Tabulka č. 1	Přehled limitních násobků pro kategorii UL letounů	10
Tabulka č. 2	Výsledné hodnoty obálky zatížení	15
Tabulka č. 3	Výsledné vyvažovací síly	18
Tabulka č. 4	Výsledné hodnoty sil při poryvu	25
Tabulka č. 5	Souhrn vypočtených provozních zatížení výškového kormidla	30
Tabulka č. 6	Maximální provozní zatížení výškového kormidla	30
Tabulka č. 7	Početní zatížení výškového kormidla	31
Tabulka č. 8	Souhrn vypočtených součinitelů rezerv výškového kormidla	38
Tabulka č. 9	Souhrn hmotností a těžišť dílů výškového kormidla	41

Seznam grafů

Graf č. 1	Výsledná obálka obratů dle předpisu UL 2	11
Graf č. 2	Výsledná obálka poryvů dle předpisu UL 2	13
Graf č. 3	Výsledná klapková obálka dle předpisu UL 2	14
Graf č. 4	Výsledná letová obálka	16
Graf č. 5	Průběh měrného zatížení na ploše - manévr	20
Graf č. 6	Průběh spojitého zatížení po polorozpětí výškového kormidla	21
Graf č. 7	Průběh posouvající síly po VK s reakcemi od závěsů - manévr	23
Graf č. 8	Průběh ohybového momentu po VK s reakcemi od závěsů - manévr	23
Graf č. 9	Průběh kroutícího momentu po výškovém kormidle - manévr	24
Graf č. 10	Průběh měrného zatížení na ploše - poryv	26
Graf č. 11	Průběh spojitého zatížení po výškovém kormidle - poryv	27
Graf č. 12	Průběh posouvající síly po VK s reakcemi od závěsů - poryv	28
Graf č. 13	Průběh ohybového momentu po VK s reakcemi od závěsů - poryv	28
Graf č. 14	Průběh kroutícího momentu po výškovém kormidle - poryv	29

Seznam příloh

Příloha	Výchozí parametry letounu pro návrh výškového kormidla

Seznam použitých zkratek

CS – VLA	Certifikační specifikace pro velmi lehké letouny
EAS	ekvivalentní rychlost letu podle vztahu EAS = TAS $(p_H/p_0)^{1/2}$, kde p_H...hustota ve výšce H m, p_0 hustota ve výšce 0
VK	výškové kormidlo
VOP	vodorovná ocasní plocha
UL	ultralehký letoun
ULLa	ultralehkých letounů řízených aerodynamicky

Seznam použitých symbolů

a	sklon vztlakové čáry křídla	[1/rad]
b	hloubka	[m]
c_{SAT}	střední aerodynamická tětiva	[-]
E	modul pružnosti	[MPa]
F	síla	[N]
g	gravitační zrychlení	[m/s^2]
G	tíha letounu	[kg]
h	výška	[m]
q	smykový tok	[N.m]
K_k	koeficient bezpečnosti	[-]
l	rozpětí	[m]
m_{MTOW}	maximální vzletová hmotnost	[kg]
M_K	kroutící moment	[N.m]
Mo	ohybový moment	[N.m]
n	násobek zatížení	[-]
P_{VOP}	vyvažovací síla vodorovné ocasní plochy	[N]
r	poloměr	[m]
S	plocha	[m^2]
T	posouvací síla	[N]
V	rychlost letu	[km/h]
W	velikost měrného zatížení na ploše	[-]
$W^=$	průměrné provozní zatížení plochy	[Pa]
η	součinitel rezervy	[-]
σ	normálové napětí	[MPa]
τ	smykové napětí	[MPa]

Seznam použitých programů

Micorsoft Excel 2016
Microsoft Word 2016
Solid Edge EST9
SOLIDWORKS 2016 x64 Edition

1. Úvod

Práce řeší problematiku výškového kormidla ultralehkého letounu řízeného aerodynamicky. První část je zaměřena na konstrukční návrh výškového kormidla, popis jeho základních konstrukčních prvků a jejich uspořádání v konstrukci. Navržené výškové kormidlo je tvořeno hlavním nosníkem, třemi žebry, obrysovou výztuhou a potahem.

Druhá část práce se věnuje stanovení působícího zatížení na kormidlo dle požadavků předpisu, do kterého letoun svými parametry spadá a který musí pro svou samotnou letovou způsobilost splňovat. Je tu sestavena letová obálka skládající se z obálky obratů, poryvové obálky a klapkové obálky násobků. Z této obálky jsou zjištěna kritická místa a ta jsou následně použita k výpočtům vyvažovacího a poryvového zatížení.

V následující části je řešena poloha elastické osy a přerozdělení zatížení v potahu dvoudutinové soustavy výškového kormidla s jedním hlavním nosníkem. V návaznosti na to jsou dimenzovány základní konstrukční prvky nosníku a potahu a provedeny pevnostní výpočty pro stanovení součinitelů rezerv u potahu, a to jak pro přední tak i zadní část, stojiny a obou pásnic.

Závěrečná část práce je zaměřena na hmotový rozbor samotné navržené konstrukce výškového kormidla. Základem je vytvoření 3D modelu navrženého výškového kormidla, který slouží k zjištění hmotnosti jednotlivých dílů výškového kormidla, včetně lepených spojů a určení celkové hmotnosti kormidla. Rovněž zde jsou pro jednotlivé díly odečteny polohy těžiště a poloha těžiště celého výškového kormidla.

2. Konstrukční návrh výškového kormidla

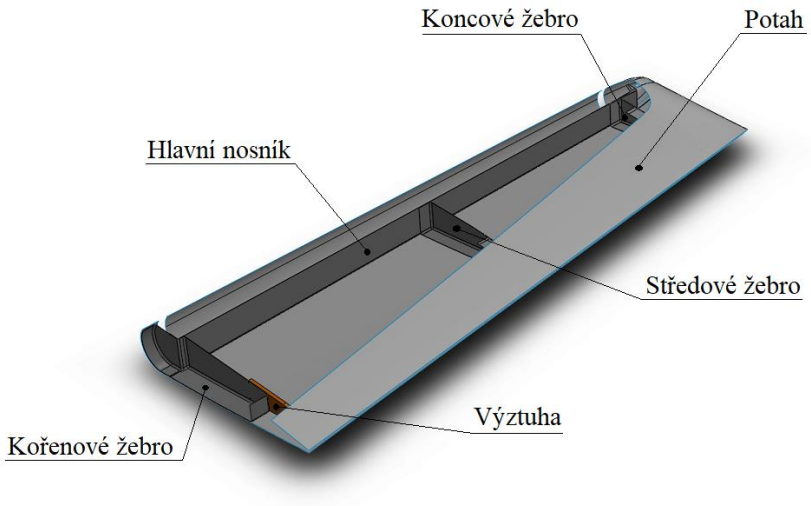
V následujících kapitolách této bakalářské práce je řešena konstrukce výškové kormidla ultralehkého letounu a jeho první konstrukční návrh jako dvoudutinová konstrukce s jedním hlavním nosníkem, dvěma žebry v místech závěsů a jedním žebrem uprostřed k podpoře tvaru potahu. Pro konstrukci výškového kormidla stejně jako pro konstrukci celé ocasní plochy platí obdobná pravidla a předpoklady jako pro návrh křídla. Výškové kormidlo je v zásadě menší křídlo. Při návrhu konstrukce výškového kormidla je nezbytné vycházet z koncepce letounu jako celku, např. z návrhové hmotnosti, rychlosti nebo plochy křídel letounu. Nosná konstrukce kormidla je tvořena prvky systému podélných a příčných nosných elementů a potahu.

2.1 Výškové kormidlo - popis

Výškové kormidlo představuje pohyblivou část vodorovné ocasní plochy. Vodorovná ocasní plocha je podle rozpětí průběžná (nedělená) nebo dělená (konzolová). Dále se rozlišuje vodorovná ocasní plocha podle hloubky na plovoucí a dělenou. Dělená vodorovná ocasní plocha se skládá z pevné části, kterou je stabilizátor, a z pohyblivé části, kterou je výškové kormidlo. Výškové kormidlo může být dělené nebo nedělené. Nedělené výškové kormidlo se používá, je-li osa otáčení výškového kormidla přímá a slouží k ovládání sklonu letounu při letu směrem nahoru a dolů, a tím dochází ke změně letové hladiny.

Změna polohy výškového kormidla ovlivňuje způsob proudění vzduchu obtékajícího vodorovnou ocasní plochu, a tím mění aerodynamické síly působící na tuto plochu. Při zvýšení vztlaku na vodorovnou ocasní plochu (klapky směřují dolů), záď letadla se zvedá. V důsledku zvýšení vztlaku na ocasní ploše dojde k poklesu vztlaku na křídlech letounu a letoun začne klesat. Naopak při snížení vztlaku na vodorovnou ocasní plochu (klapky směřují nahoru), dojde ke zvýšení vztlaku na křídlech letounu a letoun stoupá. Při zvýšení náběhu se ovšem vztlak na křídlech zvyšuje s ohledem na rychlost pouze do určitého stupně vychýlení letounu.

Pro návrh jednotlivých aerodynamických a geometrických parametrů výškového kormidla platí prakticky stejná pravidla, jako pro návrh křídla.



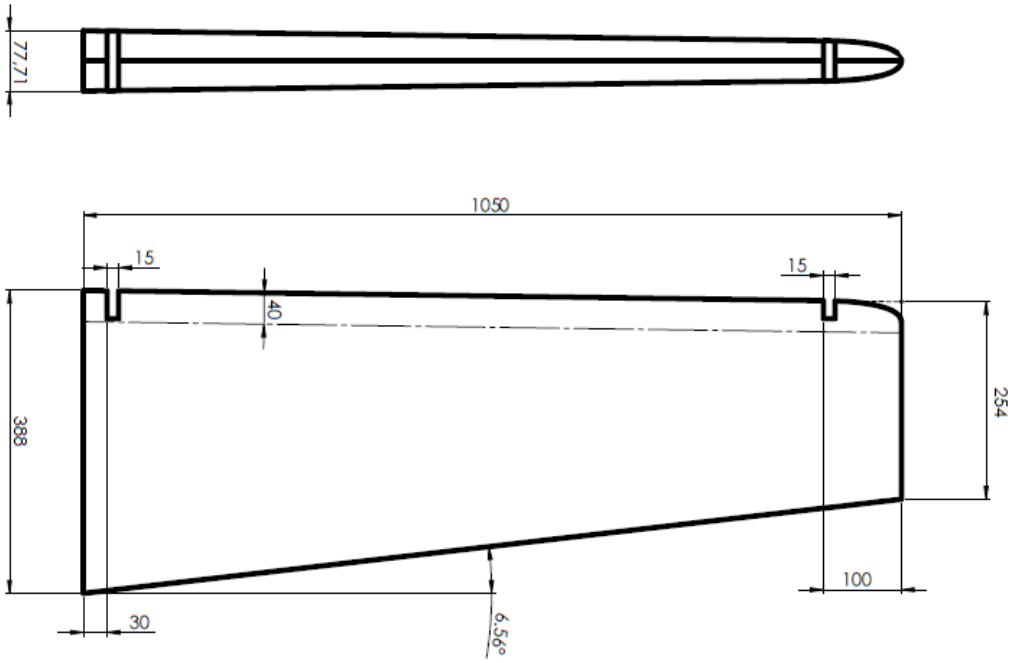
Obrázek č. 1 Model výškového kormidla

2.1.1 Konstrukce nosníku, žebra a potahu

Podélný systém přenosu sil navrhovaného výškového kormidla tvoří nosník, který se skládá ze stojiny a ze dvou pásnic umístěných vespod a nahoře nosníku. Pásnice přenášejí celý nebo převážnou část ohybu výškového kormidla.

Příčný systém se skládá z žeber a obrysových výztuh, které vytváří obrysotvorné prvky k podpoře potahu a slouží k udržení tvaru samotného výškového kormidla za letu. Ve vztahu k přenosu zatížení je jejich hlavní úkolem přenos zatížení z podélníků a přilehlých polí potahu výškového kormidla na nosník.

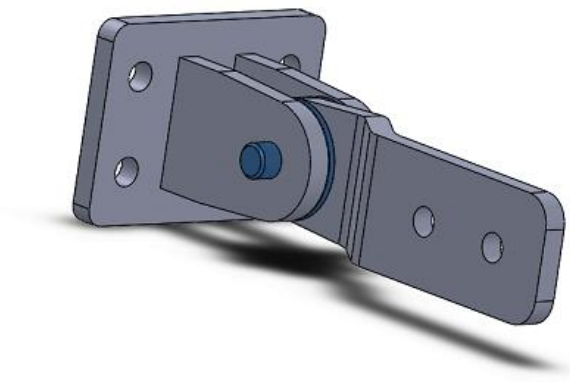
Potahy výškového kormidla jsou z pohledu smykového zatížení rozděleny na nosné a nenosné. V případě navrhovaného kormidla se jedná o nosný potah vyztužený podélně hlavním nosníkem a příčně dvěma žebry, který je vytvořen z monolitních kompozitových potahových panelů.



Obrázek č. 2 Schéma výškového kormidla s popsanými základními parametry

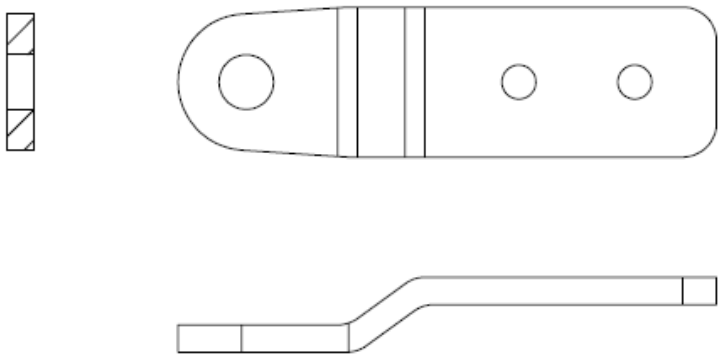
2.1.2 Konstrukce závěsů

V konstrukci navrženého výškového kormidla budou umístěny dva závěsy na kořenovém a na koncovém žebru. Pomocí těchto závěsů je výškové kormidlo spojeno se stabilizátorem. Upevnění závěsu k žebrům se navrhuje řešit šroubovými spoji.



Obrázek č. 3 Princip funkce závěsu výškového kormidla a stabilizátoru

Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o díly více namáhané používá se k jejich výrobě slitiny lehkých kovů, například dural či superdural. Z pevnostního hlediska budou závěsy kontrolovány na utržení oka, vysmeknutí čepu a roztržení oka.



Obrázek č. 4 Schéma možného řešení závěsů pro navržené výškové kormidlo

3. Zatížení výškového kormidla

Při výpočtech zatížení výškového kormidla se vychází z předpisu UL 2 – I. část, který stanovuje minimální požadavky letové způsobilosti letounu.

3.1 Požadavky předpisů

Při konstruování ultralehkých letounů je nezbytné dodržovat minimální požadavky letové způsobilosti stanovené příslušným předpisem přímo pro daný typ letounu. Předpisy volíme s ohledem na hmotnost a dalších parametry letounu.

Minimální požadavky letové způsobilosti pro počítaný letoun jsou stanoveny výše uvedeným předpisem, který obsahuje požadavky na letovou způsobilost ultralehkých letounů řízených aerodynamicky. Tento předpis byl zvolen vzhledem ke skutečnosti, že předpokládaná vzletová hmotnost letounu nepřekročí 472,5 kg a jeho minimální pádová rychlost V_{SO} při stanovených podmínkách není vyšší než 65 km/hod a současně, že konstruovaný letoun nebude využíván pro akrobatické létání.

Výše uvedený předpis stanovuje minimální požadavky pro letové vlastnosti, pevnost, návrh konstrukce, pohonnou soustavu, výstroj, provozní omezení, motory, vrtule a základní aerodynamický a pevnostní výpočet. Je nezbytné mít na paměti, že předpis neobsahuje všechny v současné době známé znalosti v oboru letecké techniky a při konstruování je nutné respektovat i nově známé skutečnosti. Kromě uvedeného předpisu je třeba dodržovat samostatné stavební předpisy UL letounů.

Letové vlastnosti konstruovaného letounu musí být podrobeny zkouškám pro veškeré konfigurace, na jejichž základě bude udělena certifikace. Rozsah letových zkoušek určuje Letecká amatérská asociace České republiky.

V oblasti pevnosti stanovuje předpis požadavky na provozní a letové zatížení letounu, uvádí součinitele bezpečnosti pro jednotlivé dílce konstrukce. Požadavky na pevnost konstrukce se stanovují pomocí V-n diagramu, který je dán kombinací rychlostí letu a násobkem zatížení. Předpis tak stanovuje i požadavky na pevnost vodorovných ocasních ploch, a tím i pro výpočet parametrů výškového kormidla.

U částí letounu, které jsou podstatné pro provozní bezpečnost a u kterých nelze pevnost ověřit výpočty, se pevnost prokazuje zkouškami. Při těchto zkouškách se například prověřuje pevnost spojů, které vznikají lepením, bodovým svářením atd., kvalita samojistných matic, únavová pevnost, odolnost proti škodlivým vlivům koroze, zvětrávání nebo otěru a podobně.

Důležitou kapitolou uvedeného předpisu jsou aerodynamické a pevnostní výpočty pro jednotlivé části letounu. Předpis určuje, které výpočty musí být při konstruování provedeny. V případě ocasních plochy stanovuje výpočet geometrické charakteristiky vodorovné ocasní plochy, mohutnosti ocasní plochy, aerodynamické charakteristiky profilů, Reynoldsovo číslo, sklon vztlakové čáry a úhel nastavení vodorovné ocasní plochy.

Přílohou předpisu jsou náhradní výpočty jednotkových zatížení zadních částí letounu a základní případy přistání jak se záďovým, tak s příďovým kolem.

3.2 Letová obálka

Letová obálka je jeden ze základních dokumentů, který stanovuje provozní hranice letounu pro jeho bezpečný provoz. Při stanovení letové obálky se vychází z návrhových rychlostí letu a limitních násobků zatížení, které pro naši kategorii letounů udává předpis UL 2. Tímto se určí krajní hranice pro zatížení konstrukce.

Násobky	Kategorie-UL
n1	4
n2	4
n3	-1,5
n4	-2

Tabulka č. 1 Přehled limitních násobků pro kategorii UL letounů

3.2.1 Obratová obálka

Veškeré zde dále uváděné rychlosti jsou ekvivalentní (EAS).

a) Pádová rychlost na klapkách V_{S0}

Požadovaná pádová rychlost na klapkách je dána dle předpisu $V_{S0} = 65\ km/h$.

V_{S0} …pádová rychlost v přistávací konfiguraci

b) Pádová rychlost V_{S1}

$$V_{S1} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MTOW} \cdot g}{\rho \cdot c_{Lmax} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 472{,}5 \cdot 9{,}81}{1{,}225 \cdot 1{,}524 \cdot 8{,}8}} = 23{,}7546\ m/s = 85{,}5\ km/h$$

V_{S1} … pádová rychlost při maximální návrhové hmotnosti, zasunutých vztlakových klapkách a s motorem ve volnoběhu

c) Pádová rychlost na zádech V_G

$$V_G = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MTOW} \cdot g}{\rho \cdot c_{Lmin} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 472{,}5 \cdot 9{,}81}{1{,}225 \cdot 0{,}8 \cdot 8{,}8}} = 32{,}7866\ m/s = 118\ km/h$$

d) Návrhová rychlost na zádech V_{G1}

Počítána pro násobek zatížení $n_4 = -2$

$$V_{G1} = \sqrt{\frac{2 \cdot n_4 \cdot m_{MTOW} \cdot g}{\rho \cdot c_{Lmin} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 472{,}5 \cdot 9{,}81}{1{,}225 \cdot 0{,}8 \cdot 8{,}8}} = 46{,}3672\ m/s = 166{,}9\ km/h$$

e) Návrhová obratová rychlost V_A

$$V_A = V_{s1} \cdot \sqrt{n_1} = 85{,}5 \cdot \sqrt{4} = 171 \ km/h$$

f) Návrhová rychlost letu s vysunutými vztlakovými klapkami V_F

Při všech přistávacích konfiguracích nesmí být menší než větší z následujících případů:

$$V_F = 1{,}4 \cdot V_{S1} = 1{,}4 \cdot 85{,}5 = 119{,}7 \ km/h$$

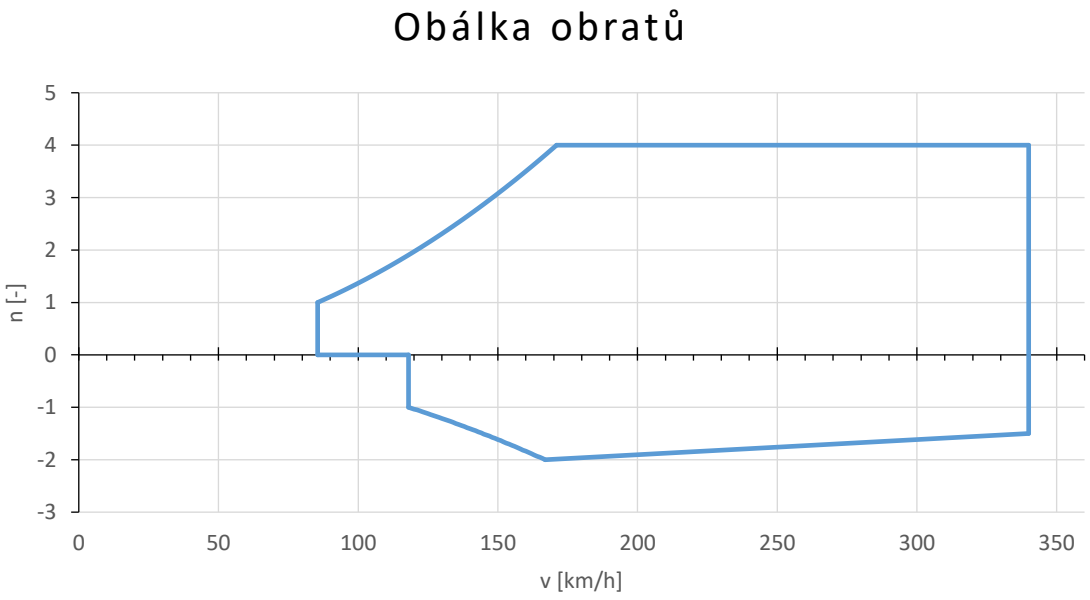
$$V_F = 1{,}8 \cdot V_{S0} = 1{,}4 \cdot 65 = 117 \ km/h$$

Z výše uvedeného volím $V_F = 119{,}7 \ km/h$.

g) Návrhová maximální rychlost V_D

$$V_D > 1{,}2 \cdot V_A$$

$$340 \ km/h > 205{,}2 \ km/h$$



Graf č. 1 Výsledná obálka obratů dle předpisu UL 2

3.2.2 Poryvová obálka

Protože není k dispozici přesnější výpočet odpovídající skutečným podmínkám, vycházíme z náhradního výpočtu dle předpisu UL 2 – I. část.

a) Poryvový násobek zatížení

$$n = 1 \pm \frac{\frac{k}{2} \cdot \rho_0 \cdot U \cdot V \cdot a}{\frac{m_{MTOW} \cdot g}{S}}$$

kde ρ_0 … hustota vzduchu ve výšce 0 m MSA ($\rho_0 = 1{,}225\ kg/m^3$)
U … rychlost poryvu ($U = \pm 15\ m/s;\ \pm 7{,}5\ m/s$)
V … rychlost letu $[m/s]$
a … sklon vztlakové čáry křídla
m_{MTOW} … maximální vzletová hmotnost $[kg]$
k … zmírňující součinitel
g … gravitační zrychlení ($g = 9{,}81\ m/s^2$)

$$k = \frac{0{,}88 \cdot \mu}{5{,}3 + \mu} \qquad\qquad \mu = \frac{2 \cdot \frac{m}{S}}{\rho_0 \cdot a \cdot c_{SAT}}$$

kde μ … hmotový poměr
c_{SAT} …střední aerodynamická tětiva $[m]$

Hmotový poměr:

$$\mu = \frac{2 \cdot \frac{m}{S}}{\rho_0 \cdot a \cdot c_{SAT}} = \frac{2 \cdot \frac{472{,}5}{8{,}8}}{1{,}225 \cdot 4{,}645 \cdot 1{,}306} = 14{,}45\ [-]$$

Zmírňující součinitel:

$$k = \frac{0{,}88 \cdot \mu}{5{,}3 + \mu} = \frac{0{,}88 \cdot 14{,}45}{5{,}3 + 14{,}45} = 0{,}643855\ [-]$$

b) Pro poryvové zatížení poryvem rychlosti $\pm 15\ m/s$ se uvažuje rychlost letu V_A

$$n = 1 \pm \frac{\frac{k}{2} \cdot \rho_0 \cdot U \cdot V \cdot a}{\frac{m_{MTOW} \cdot g}{S}} = 1 \pm \frac{\frac{0{,}643855}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 15 \cdot 47{,}5 \cdot 4{,}645}{\frac{472{,}5 \cdot 9{,}81}{8{,}8}}$$

$$+n = 3{,}47786\ [-]$$
$$-n = 1{,}47786\ [-]$$

c) Pro poryvové zatížení poryvem rychlosti $\pm 7{,}5\ m/s$ se uvažuje rychlost letu V_D

$$n = 1 \pm \frac{\frac{k}{2} \cdot \rho_0 \cdot U \cdot V \cdot a}{\frac{m_{MTOW} \cdot g}{S}} = 1 \pm \frac{\frac{0{,}643855}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 7{,}5 \cdot 94{,}444 \cdot 4{,}645}{\frac{472{,}5 \cdot 9{,}81}{8{,}8}}$$

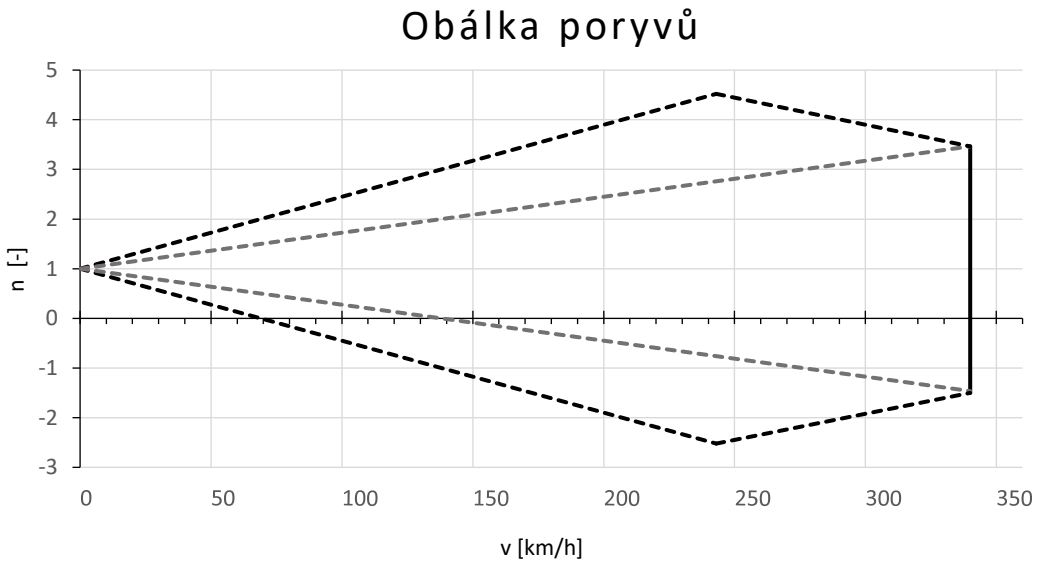
$$+n = 3{,}46337\ [-]$$
$$-n = 1{,}46337\ [-]$$

d) Návrhová rychlost při silném poryvu V_B

Maximální návrhová rychlost může být volena navrhovatelem, ovšem nesmí být menší než větší z následujících hodnot

$$V_B = 0{,}9 \cdot V_H = 0{,}9 \cdot 270 = 243\ km/h$$
$$V_B = V_A = 171\ km/h$$

$\Rightarrow\ V_B = 243\ km/h$



Graf č. 2 Výsledná obálka poryvů dle předpisu UL 2

3.2.3 Klapková obálka

Jestliže má letoun vztlakové klapky, musí být uvažován kladný provozní násobek $n = 2{,}0$ přičemž se uvažují polohy klapek od "zasunuté" až do "maximální kladné nebo záporné výchylky" a rychlosti až do návrhové rychlosti V_F.

a) Návrhová pádová rychlost s plně vysunutými klapkami V_{SF}

$$V_{SF} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MTOW} \cdot g}{\rho_0 \cdot S \cdot c_{L_{klap}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 472{,}5 \cdot 9{,}81}{1{,}225 \cdot 8{,}8 \cdot 2{,}594}} = 18{,}21\, m/s = 65{,}55\ km/h$$

b) Návrhová obratová rychlost s plně vysunutými klapkami V_{AK}

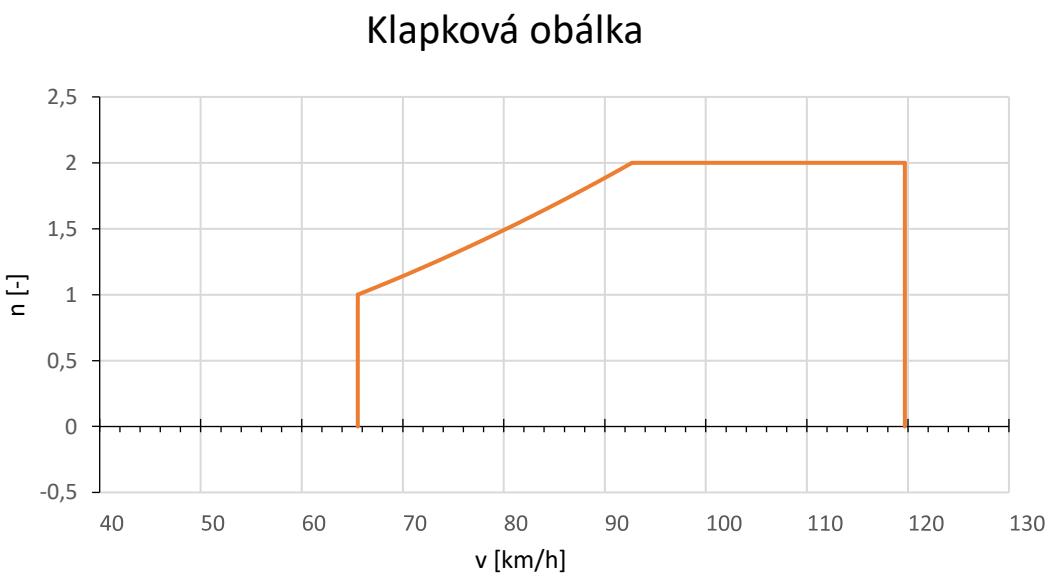
$$V_{AK} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{MTOW} \cdot g \cdot n_{K+}}{\rho_0 \cdot S \cdot c_{L_{klap}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 472{,}5 \cdot 9{,}81 \cdot 2}{1{,}225 \cdot 8{,}8 \cdot 2{,}594}} = 25{,}75\, m/s = 92{,}70\ km/h$$

c) Návrhová maximální klapková rychlost V_F :

Volí se větší z těchto dvou vypočtených rychlostí:

$$V_{F1} = 1{,}4 \cdot V_{S1} = 1{,}4 \cdot 85{,}5 = 119{,}7\ km/h$$
$$V_{F2} = 1{,}8 \cdot V_{SF} = 1{,}8 \cdot 65{,}55 = 117{,}9\, km/h$$

$$\Rightarrow V_F = 33{,}25\, m/s = 119{,}7\, km/h$$



Graf č. 3 Výsledná klapková obálka dle předpisu UL 2

3.2.4 Souhrn všech výsledných návrhových rychlostí a násobků

Hodnoty rychlostí a násobků:

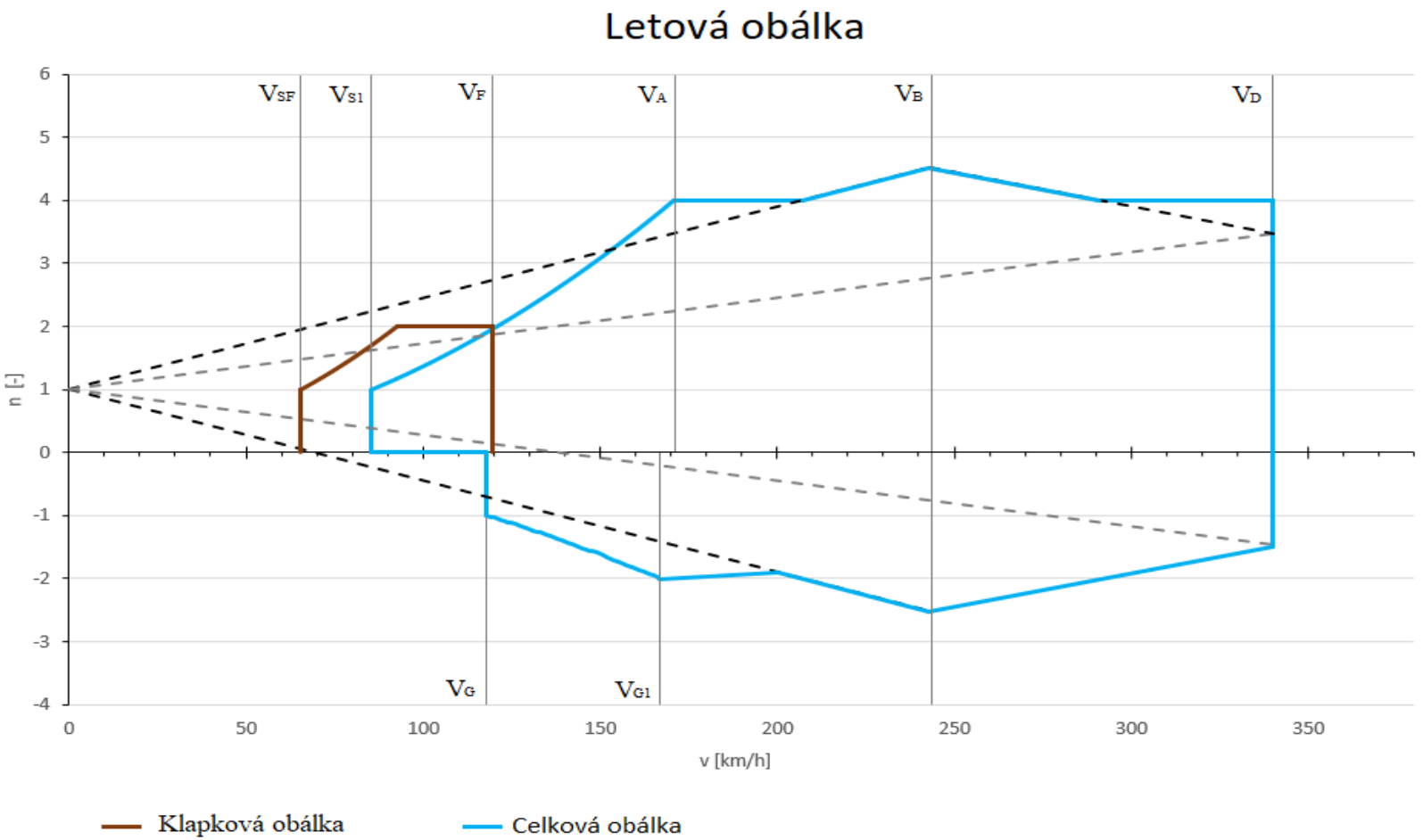
Obratová obálka			
Rychlosti letu [km/h]		Předpisový násobek	
		+	-
V_{S0}	65	1	0
V_{S1}	85,5	1	0
V_G	118,032	0	-1
V_{G1}	166,922	0	-2
V_A	171	4	-2
V_F	119,7	2	0
V_D	340	4	-1,5

Poryvová obálka					
Rychlosti letu [km/h]		Předpisový násobek		Násobek od poryvu	
		+	-	+	-
V_A	171	4	-2	3,48	-1,48
V_D	340	4	-1,5	3,46	-1,46
V_B	243			4,52	-2,52

Klapková obálka			
Rychlosti letu [km/h]		Předpisový násobek	
		+	-
V_{SF}	65,55	1	0
V_{AK}	92,7	2	0
V_F	119,7	2	0

Tabulka č. 2 Výsledné hodnoty obálky zatížení

3.2.5 Výsledná letová obálka



Graf č. 4 Výsledná letová obálka

3.3 Vyvažovací zatížení vodorovné ocasní plochy

Vyvažovací zatížení na vodorovné ocasní ploše musí vyvážit klopivý moment vznikající na křídle posunem výslednice vztlaku při každém režimu letu bez klopivých zrychlení kolem příčné osy. Rovněž musí být vodorovná ocasní plocha navržena pro taková vyvažovací zatížení, která se vyskytnou při jakémkoli bodu obálky a při jakékoli poloze vztlakových klapek.

a) Vyvažovací síla

$$P_{VOP} = \frac{M_Y}{L_{VOP}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot S \cdot c_{SAT} \cdot c_m + n \cdot m_{MTOW} \cdot g \cdot c_{SAT} \cdot (\bar{x}_t - \bar{x}_A)}{L_{VOP}}$$

c_m … součinitel klopivého momentu [–]
$\bar{x}_t$ … poloha těžiště k délce střední aerodynamické tětivy $[m]$
$\bar{x}_A$ … poloha aerodynamického středu kombinace křídlo-trup $[m]$

Ukázka výpočtu pro bod V_A a kladný násobek letové obálky

$$P_{VOP} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot S \cdot c_{SAT} \cdot c_m + n \cdot m_{MTOW} \cdot g \cdot c_{SAT} \cdot (\bar{x}_t - \bar{x}_A)}{L_{VOP}} = \cdots$$

$$\ldots = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 45{,}5^2 \cdot 8{,}8 \cdot 1{,}306 \cdot (-0{,}099) + 4 \cdot 472{,}5 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}202}{3{,}44} = \cdots$$

$$\ldots = 631{,}65\ N$$

kde $\rho_0 = 1{,}225\ kg/m^3$
$v = 47{,}5\ m/s$
$c_{SAT} = 1{,}306$
$c_m = -0{,}099$
$n = 4$
$m_{MTOW} = 472{,}5\ kg$
$c_{SAT} \cdot (\bar{x}_t - \bar{x}_A) = 0{,}202$

b) Tíhová síla od vlastní hmotnosti

$$P_{VOPsetr} = n \cdot m_{VOP} \cdot g$$

Ukázka výpočtu pro bod V_A a kladný násobek letové obálky

$$P_{VOPsetr} = n \cdot m_{VOP} \cdot g = 4 \cdot 8{,}9 \cdot 9{,}81 = 349{,}20\ N$$

kde $n = 4$
$m_{VOP} = 8{,}9\ kg$

c) Celková zatěžovací síla

Tato síla je interakcí obou předchozích sil. Tíhová síla od vlastní hmotnosti ocasní plochy se přičítá nebo odečítá k vyvažovací síle a to podle smyslu působení násobku.

$$P_{VOP_{VYV}} = P_{VOP} - P_{VOP_{setr}}$$

Ukázka výpočtu pro bod V_A a kladný násobek letové obálky

$$P_{VOP_{VYV}} = P_{VOP} - P_{VOP_{setr}} = 631{,}655 - 349{,}2 = 282{,}42\ N$$

Vyvažovací síly na VOP								
Bod obálky	Násobek $[-]$	Rychlost $[km/h]$	Rychlost $[m/s]$	Hmotnost $[kg]$	P_{VOP} $[N]$	$P_{VOP_{setr}}$ $[N]$	$P_{VOP_{VYV}}$ $[N]$	P_{MAX} $[N]$
V_A	4	171	47,5	472,5	631,65	349,2	282,42	−2 084,3
	−2				−1 001,5	−174,6	−826,83	
V_F	2	119,7	33,25		320,398	174,6	145,780	
V_B	4,52	243	67,5		307,244	394,6	−87,393	
	−2,52				−1 608,9	−220	−1 388,9	
V_D	4	340	94,44		−718,27	349,2	−1 067,5	
	−1,5				−2 215,3	−131	−2 084,3	

Tabulka č. 3 Výsledné vyvažovací síly

Rozložení síly po VOP není definováno v předpise UL 2 – I. část. V tomto případě je vhodné použít rozložení zatížení po hloubce ocasních ploch definovaného v dodatku B Zatížení řídících ploch předpisu CS – VLA. Podle tohoto předpisu je podíl čistého vyvažovacího zatížení výškového kormidla při zasunutých klapkách 40 % čistého vyvažovacího zatížení, což je zanedbatelné v porovnání s ostatními případy zatížení výškového kormidla a dále v této práci nebude zohledňováno.

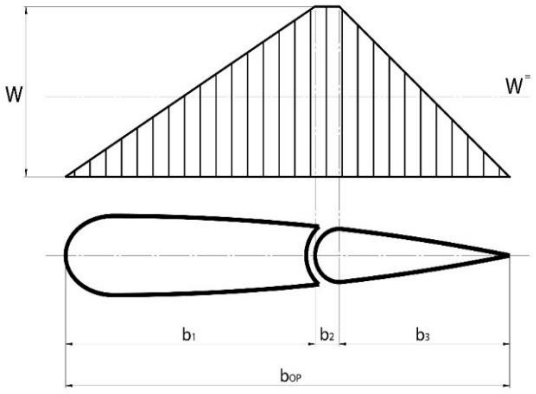
3.4 Obratová zatížení

Jestliže nejsou k dispozici přesné výpočty, postupuje se při výpočtu zatížení jednotlivých částí konstrukce konvenčních letounů podle uvedené náhradní metody, viz UL 2 – I. část Příloha I.

3.4.1 Zatížení vodorovných ocasních ploch

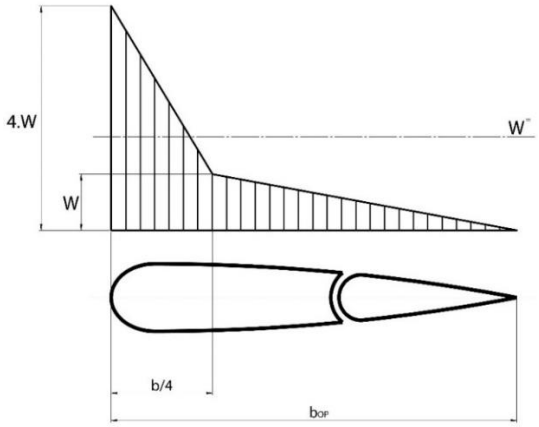
V souladu s předpisem musí být návrh vodorovných ocasních ploch zpracován pro taková obratová zatížení, která lze očekávat při letu. Níže jsou uvedeny dva případy zatížení vodorovných ocasních ploch:

a) Případ vychýlení kormidla – manévr



Obrázek č. 5 Zatěžující obrazec pro případ vychýlení kormidla

b) Případ změny úhlu náběhu – poryv



Obrázek č. 6 Zatěžující obrazec pro případ změny úhlu náběhu

kde b_1 … hloubka pevné části ocasních ploch (stabilizátor)
b_2 … hloubka od náběžné hrany po osu otáčení pohyblivé části (kormidlo)
b_3 … hloubka za osou otáčení (kormidlo)
b_{OP} … hloubka celé ocasní plochy ($b_{OP} = b_1 + b_2 + b_3$)

W … velikost měrného zatížení na ploše
$W^=$ … průměrné provozní zatížení plochy $[Pa]$

3.4.2 Zatížení pro případ vychýlení kormidla

Jako první se vypočte průměrné provozní zatížení plochy podle následujícího vzorce

$$W^{=} = 220 + 20{,}5 \cdot \left(\frac{G}{S}\right) \quad [Pa]$$

kde $W^{=}$ musí být nejméně 575 Pa.

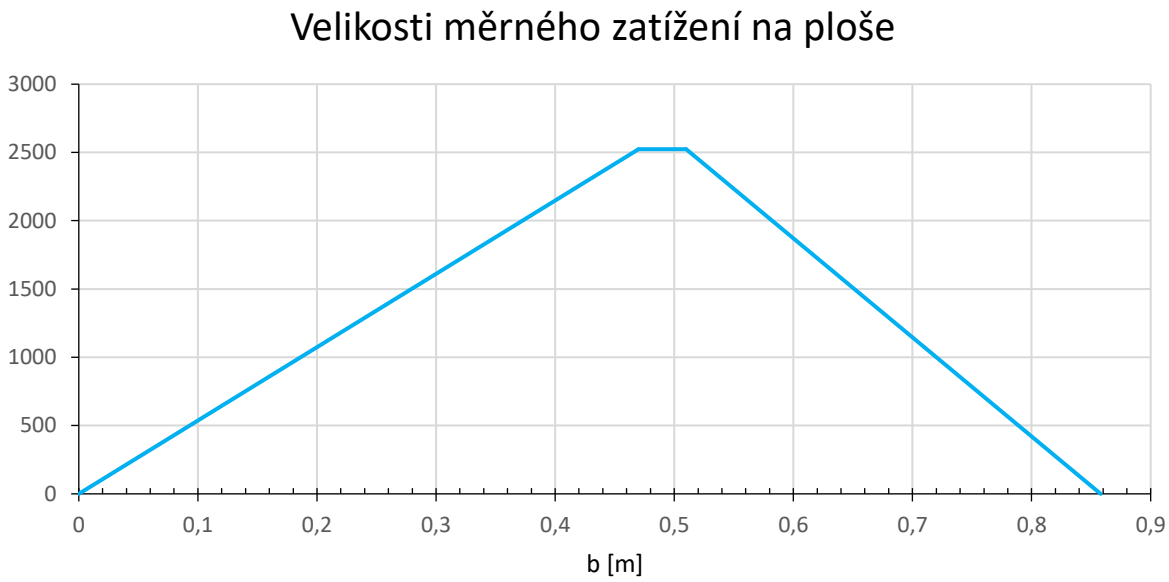
Výpočet průměrného provozního zatížení plochy pro náš případ

$$W^{=} = 220 + 20{,}5 \cdot \left(\frac{G}{S}\right) = 220 + 20{,}5 \cdot \left(\frac{472{,}5}{8{,}8}\right) = 1320{,}71\ Pa$$

Z tohoto zatížení dále vypočítáme velikost měrného zatížení na ploše a sestavíme zatěžující obrazec.

Výpočet měrného zatížení

$$W = \frac{W^{=} \cdot b_{OP}}{\frac{1}{2} \cdot b_1 + b_2 + \frac{1}{2} \cdot b_3} = \frac{1320{,}71 \cdot 0{,}858}{\frac{1}{2} \cdot 0{,}47 + 0{,}04 + \frac{1}{2} \cdot 0{,}348} = 2\,523{,}73\ [-]$$



Graf č. 5 Průběh měrného zatížení na ploše - manévr

Z průběhu velikosti měrného zatížení na ploše odečteme zatížení jednotlivých částí vodorovné ocasní plochy u kořene.

- Stabilizátor:

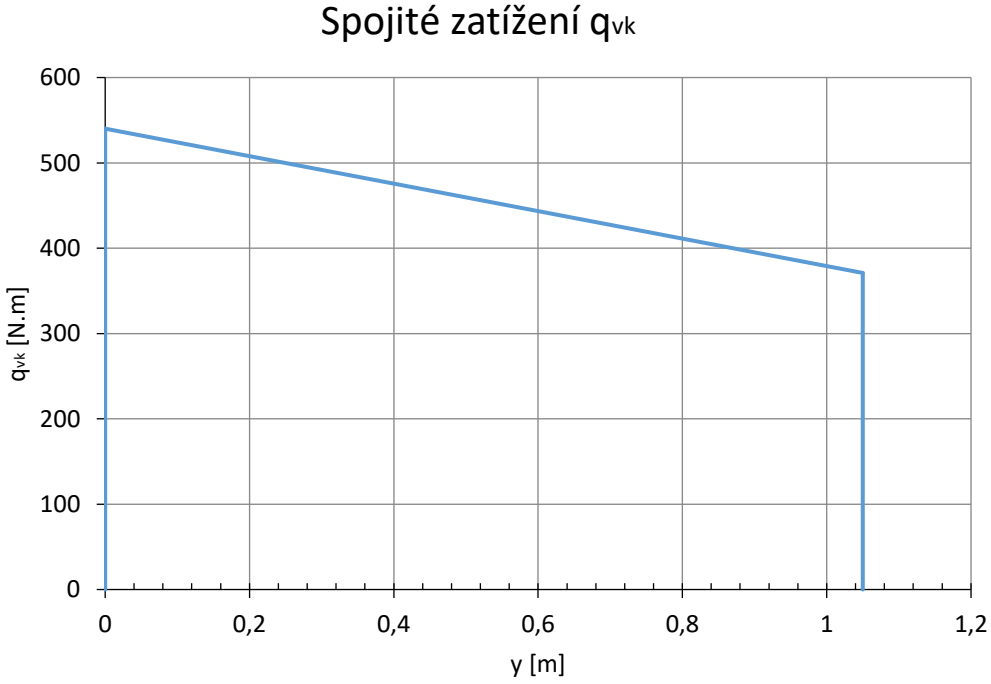
$$q_{stab.} = W \cdot \frac{b_1}{2} = 2\,523{,}73 \cdot \frac{0{,}47}{2} = 593{,}08\ N/m$$

- Výškové kormidlo:

$$q_{vk} = W \cdot b_2 + W \cdot \frac{b_3}{2} = 2\,523{,}73 \cdot 0{,}04 + 2\,523{,}73 \cdot \frac{0{,}348}{2} = 540{,}08\ N/m$$

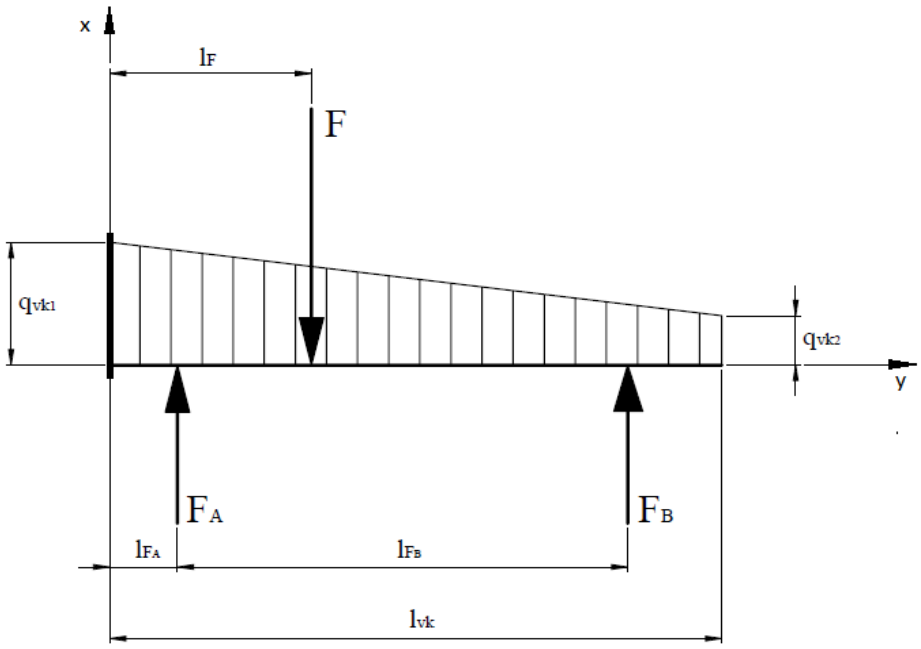
a) Průběh posouvající síly a ohybového momentu VK s reakcemi v závěsech

Pro samotné určení posouvající síly a ohybového momentu po výškovém kormidle je potřeba určit průběh spojitého zatížení po rozpětí výškového kormidla s ohledem na měnící se hloubku výškového kormidla, spojité zatížení tedy nebude po délce rozpětí konstantní.



Graf č. 6 Průběh spojitého zatížení po polorozpětí výškového kormidla

Ze stanoveného spojitého zatížení můžeme určit reakce v závěsech, ty určíme pomocí silové a momentové rovnováhy s ekvivalentní silou spojitého zatížení F.



Obrázek č. 7 Schéma zatížení výškového kormidla s reakcí v závěsech

Výpočet reakcí závěsů dle schématu

$$F = \frac{(q_{vk1} - q_{vk2})}{2} \cdot l_{vk} + q_{vk2} \cdot l_{vk} = \frac{(540{,}1 - 371)}{2} \cdot 1{,}05 + 371 \cdot 1{,}05 = 478{,}32\ N$$

$$l_F = \frac{\frac{(q_{vk1} - q_{vk2})}{6} \cdot {l_{vk}}^2 + \frac{q_{vk2}}{2} \cdot {l_{vk}}^2}{F} = \frac{\frac{540{,}1 - 371}{6} \cdot 1{,}05^2 + \frac{371}{2} \cdot 1{,}05}{567{,}09} = 0{,}493\ m$$

$$\sum F_x: \ -F + F_A + F_B = 0 \quad \Longrightarrow \quad F_A = F - F_B$$

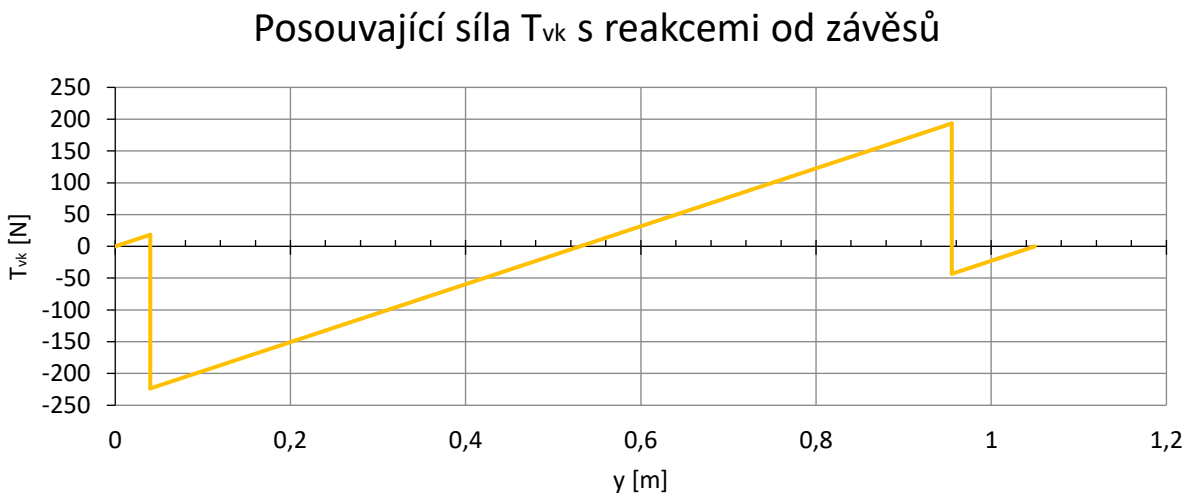
$$\sum M: \ F_A \cdot l_{F_A} - F \cdot l_F + F_B \cdot l_{F_B} = 0 \quad \Longrightarrow \quad F_B = \frac{F \cdot [l_{F_A} - l_F]}{(l_{F_A} - l_{F_B})}$$

$$F_B = \frac{487{,}32 \cdot [0{,}04 - 0{,}493]}{(0{,}04 - 0{,}955)} = 236{,}56\ N$$

$$F_A = 478{,}32 - 236{,}56 = 241{,}76\ N$$

Posouvající síla je dána jako integrace spojitého zatížení výškového kormidla po polorozpětí se zavedenými silami od závěsů v místech jejich působení na konstrukci.

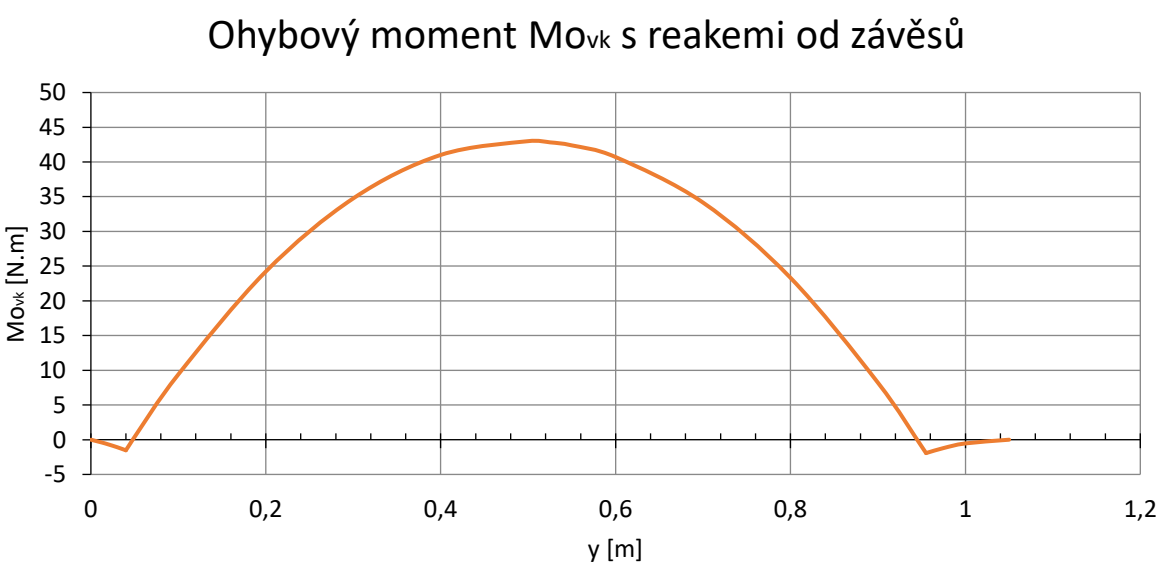
$$T_{vk} = \int_0^{\frac{l_{vk}}{2}} q_{vk}(y) \cdot dy$$



Graf č. 7 Průběh posouvající síly po VK s reakcemi od závěsů - manévr

Ohybový moment získáme ze Schwedlerovy věty pomocí integrace posouvající síly po polorozpětí se zavedením reakcí v místech závěsů.

$$Mo_{vk} = \int_0^{\frac{l_{vk}}{2}} T_{vk}(y) \cdot dy$$



Graf č. 8 Průběh ohybového momentu po VK s reakcemi od závěsů - manévr

b) Kroutící moment na VK

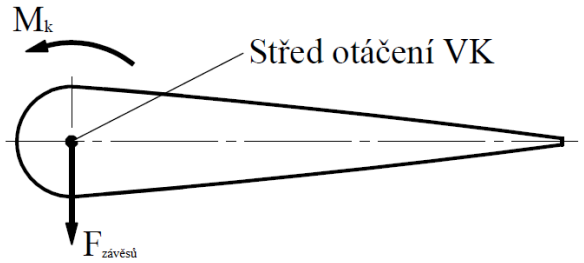
Kroutící moment vypočteme dle Schwedlerovy věty jako integrál po výškovém kormidle

$$M_{k_{vk}} = \int_0^{\frac{l_{vk}}{2}} q_{vk}(y) \cdot r(y) \cdot dy$$

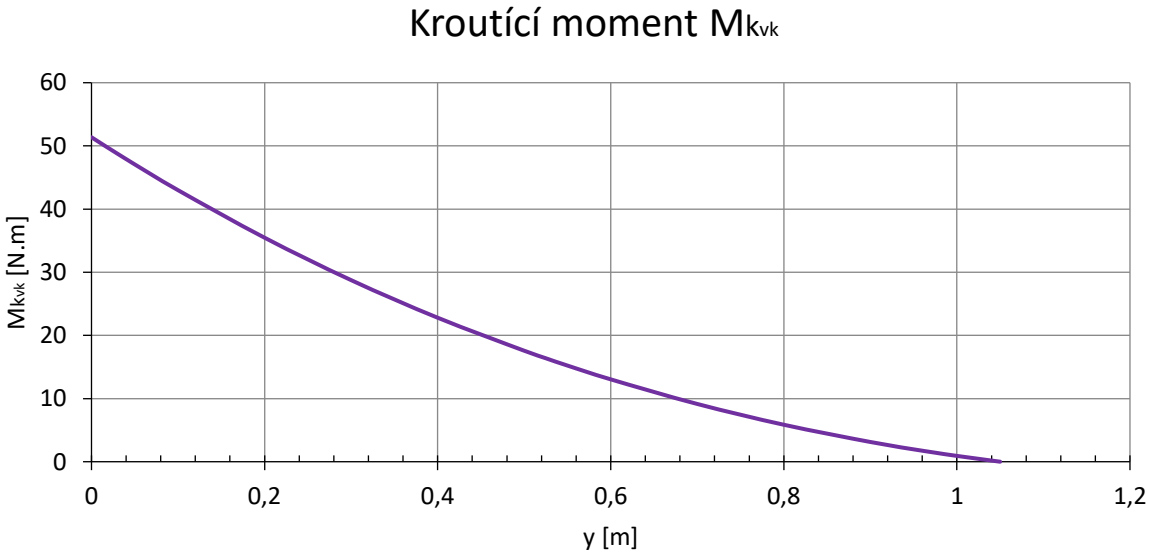
Výpočet ramena působící síly spojitého zatíženi v závislosti na hloubce VK po jeho rozpětí

$$r(y) = \frac{\frac{b_2^2}{2} + \frac{b_2 \cdot b_3}{2} + \frac{b_3^2}{6}}{b_2 + \frac{b_3}{2}} - b_2 \quad [m]$$

Do průběhu kroutícího momentu nevstupují síly od reakcí v závěsech z důvodu působení kroutícího momentu v ose otáčení, tedy v ose samotného kroutícího momentu.



Obrázek č. 8 Schéma působení kroutícího momentu na ose otáčení



Graf č. 9 Průběh kroutícího momentu po výškovém kormidle - manévr

3.5 Poryvové zatížení vodorovné ocasní plochy

Pokud není k dispozici žádný přesnější výpočet odpovídající skutečným podmínkám, použije se pro výpočet vztah z předpisu UL 2 – I. část, dle kterého se počítá působící síla na vodorovné ocasní plochy. Poryvové zatížení je řešeno pro násobek n=1 a musí být prověřeno pro hlavní body letové obálky podle následujícího vzorce

$$P_{VOP} = P_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot S_{VOP} \cdot a_{VOP} \cdot U \cdot k_{VOP} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{d\varepsilon}{d\alpha}\right)$$

kde P_{VOP} … síla na vodorovné ocasní plochy $[N]$
P_o… vyvažovací síla odpovídající výchylce ε_{VK} při dané rychlosti v horizontálního letu
ρ_0… hustota vzduchu při hladině moře
k_{VOP}… zmírňující součinitel (může být použita stejná hodnota jako u křídla)
S_{VOP}… plocha vodorovných ocasních ploch
a_{VOP}…sklon křivky vztlaku VOP
U… rychlost poryvu
V… rychlost letu
$\frac{d\varepsilon}{d\alpha}$…derivace zešikmení proudu podle úhlu náběhu

Ukázka výpočtu pro bod V_A násobek letové obálky a kladném poryvu

$$P_{VOP} = P_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot S_{VOP} \cdot a_{VOP} \cdot U \cdot k_{VOP} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{d\varepsilon}{d\alpha}\right) = \cdots$$
$$\ldots = -184{,}9 + \frac{1}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 1{,}971 \cdot 4{,}645 \cdot 15 \cdot 0{,}643855 \cdot 47{,}5 \cdot (1 - 0{,}38) = \cdots$$
$$\ldots = 1\,410\ N$$

kde $U = 15\ m/s$
$P_0 = -184{,}9\ N$
$\rho_0 = 1{,}225\ kg/m^3$
$S_{VOP} = 1{,}971\ m^2$
$a_{VOP} = 4{,}645$
$k_{VOP} = 0{,}643855$
$V = 47{,}5\ m/s$
$\frac{d\varepsilon}{d\alpha} = 0{,}38$

Poryvové zatížení VOP								
Poryv $[m/s]$	Bod obálky	Násobek $[-]$	Rychlost $[km/h]$	Rychlost $[m/s]$	Hmotnost $[kg]$	P_0 $[N]$	P_{VOP} $[N]$	P_{MAX} $[N]$
15	V_A	1	171	47,5	472,5	$-184{,}9$	1 410	$-3\,120{,}4$
-15							$-1\,779{,}8$	
15	V_B	1	243	67,5		$-650{,}9$	1 615,6	
-15							$-2\,917{,}3$	
7,5	V_D	1	340	94,44		$-1\,534{,}8$	604,9	
-7,5							$-3\,120{,}4$	

Tabulka č. 4 Výsledné hodnoty sil při poryvu

3.5.1 Případ změny úhlu náběhu - poryv

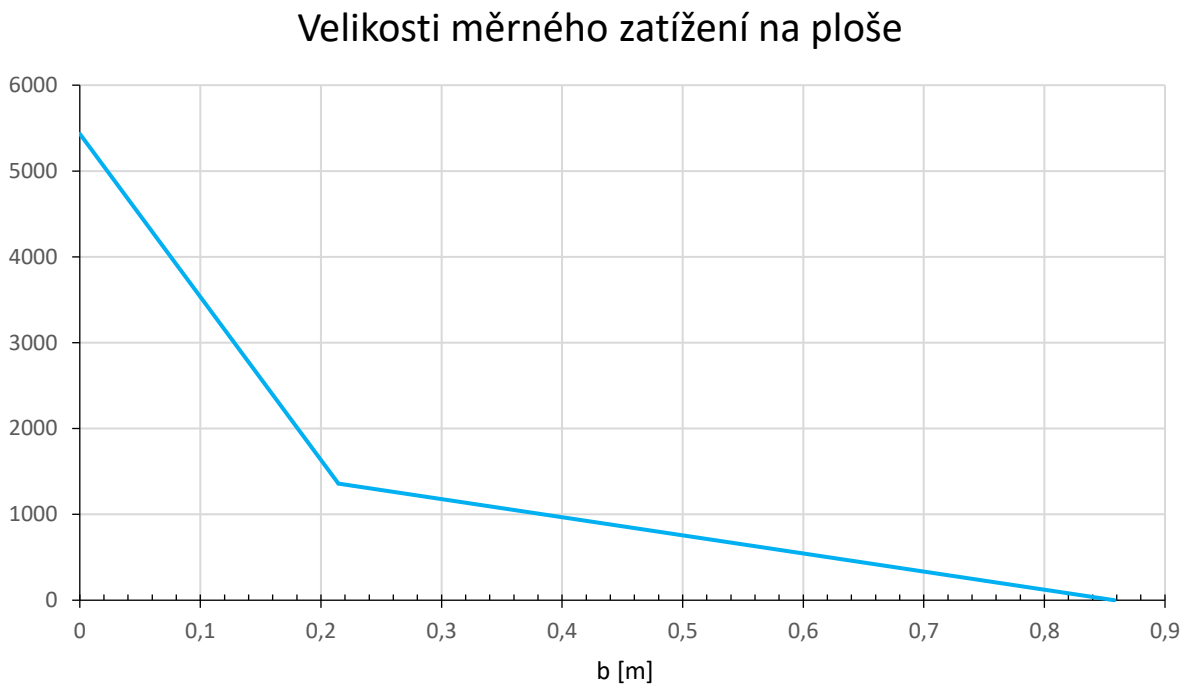
Průměrné provozní zatížení dostaneme z vypočtené maximální síly poryvu

$$W^{=} = \frac{P_{max}}{S_{VOP}} = \frac{|-3\,120{,}4|}{1{,}971} = 1\,583{,}16\ Pa$$

Z tohoto zatížení dále vypočítáme velikost měrného zatížení na ploše a sestavíme zatěžující obrazec.

Výpočet měrného zatížení na ploše pro náš případ

$$W = W^{=} \cdot b_{OP} = 1\,583{,}16 \cdot 0{,}858 = 1\,358{,}35\ [-]$$



Graf č. 10 Průběh měrného zatížení na ploše - poryv

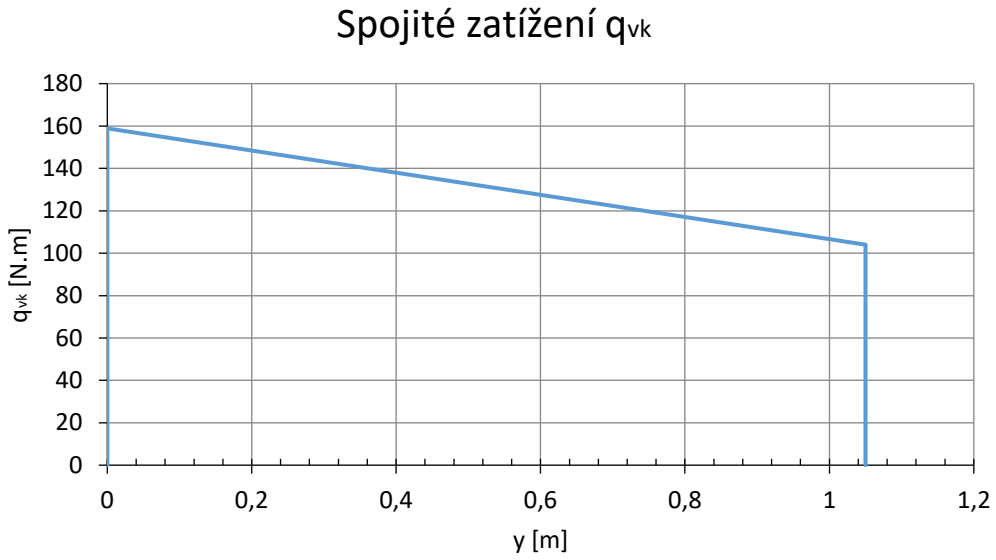
Z průběhu velikosti měrného zatížení na ploše odečteme zatížení jednotlivých částí vodorovné ocasní plochy:

- Výškové kormidlo:

$$q_{vk} = \frac{W}{\frac{3}{4} \cdot b_{OP}} \cdot \frac{(b_2 + b_3)^2}{2} = \frac{1\,358{,}35}{\frac{3}{4} \cdot 0{,}858} \cdot \frac{(0{,}04 + 0{,}348)^2}{2} = 158{,}9\ N.m$$

a) Průběh posouvající síly a ohybového momentu VK s reakcemi v závěsech

Jako první je určen průběh posouvajícího momentu po polorozpětí výškového kormidla, který je směrodatný pro další výpočty.



Graf č. 11 Průběh spojitého zatížení po výškovém kormidle - poryv

Reakce od závěsů jsou určeny stejně jako v případě vychýlení kormidla, kapitola 3.4.2 a).

Dle schématu tedy

$$F = \frac{(q_{vk1} - q_{vk2})}{2} \cdot l_{vk} + q_{vk2} \cdot l_{vk} = \frac{(158{,}9 - 104)}{2} \cdot 1{,}05 + 104 \cdot 1{,}05 = 138\ N$$

$$l_F = \frac{\frac{(q_{vk1} - q_{vk2})}{6} \cdot {l_{vk}}^2 + \frac{q_{vk2}}{2} \cdot {l_{vk}}^2}{F} = \frac{\frac{158{,}9 - 104}{6} \cdot 1{,}05^2 + \frac{104}{2} \cdot 1{,}05}{138} = 0{,}49\ m$$

$$\sum F_x: \ -F + F_A + F_B = 0 \quad \Longrightarrow \quad F_A = F - F_B$$

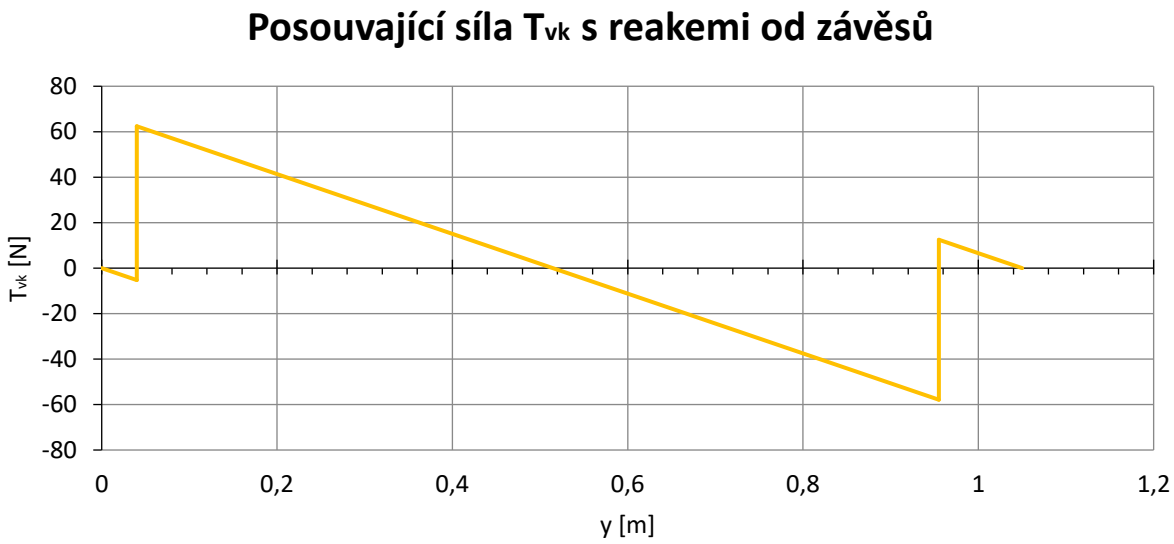
$$\sum M: \ F_A \cdot l_{F_A} - F \cdot l_F + F_B \cdot l_{F_B} = 0 \quad \Longrightarrow \quad F_B = \frac{F \cdot [l_{F_A} - l_F]}{(l_{F_A} - l_{F_B})}$$

$$F_B = \frac{138 \cdot [0{,}04 - 0{,}49]}{(0{,}04 - 0{,}955)} = 67{,}65\ N$$

$$F_A = 138 - 67{,}65 = 70{,}37\ N$$

Posouvající síla je dána jako v předešlém případě integrací spojitého zatížení výškového kormidla po polorozpětí se zavedenými silami od reakcí závěsů v místech jejich působiště.

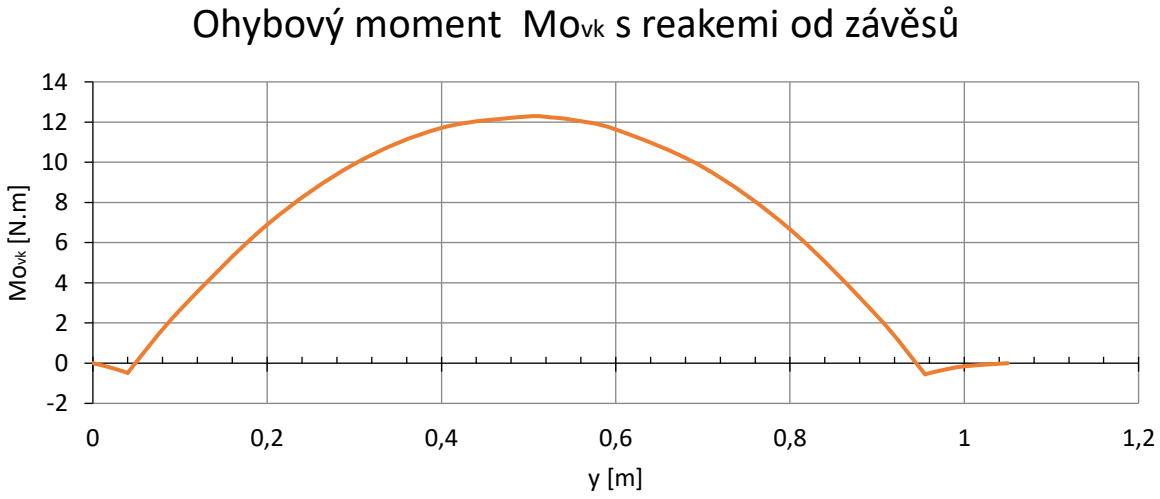
$$T_{vk} = \int_0^{\frac{l_{VOP}}{2}} q_{vk}(y) \cdot dy$$



Graf č. 12 Průběh posouvající síly po VK s reakcemi od závěsů - poryv

Ohybový moment získáme pomocí integrace posouvající síly po polorozpětí se zavedením reakcí v místech závěsů.

$$Mo_{vk} = \int_0^{\frac{l_{vk}}{2}} T_{vk}(y) \cdot dy$$

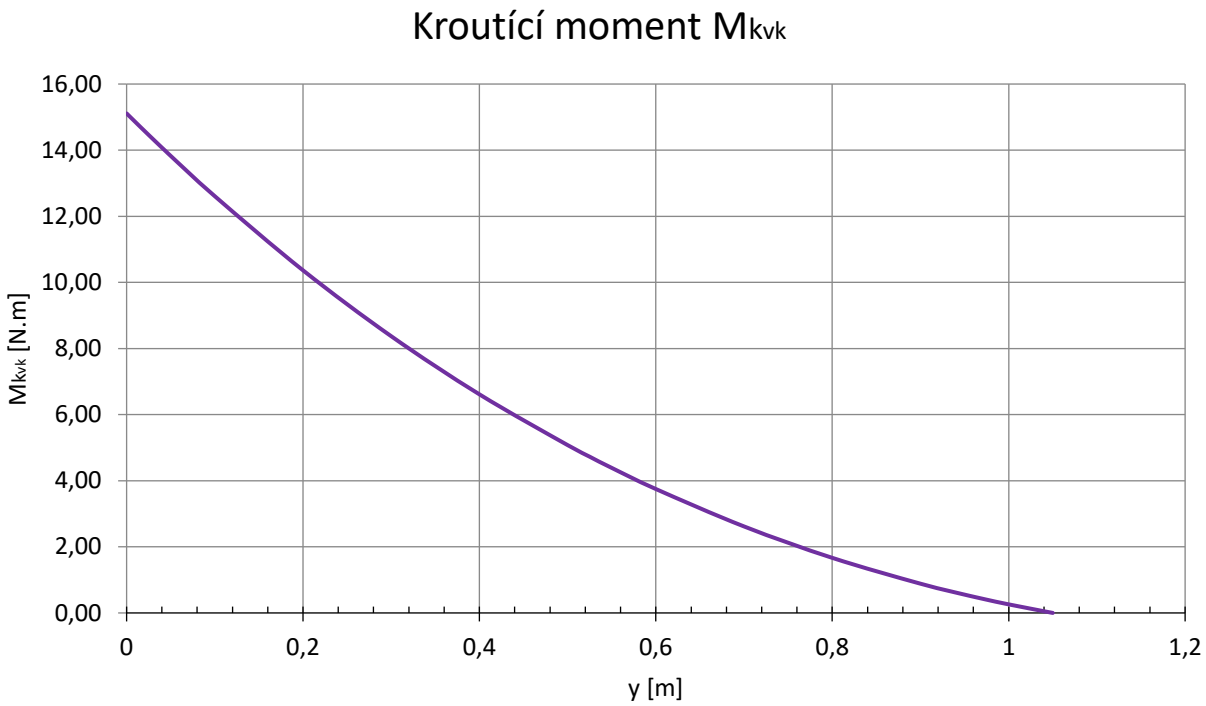


Graf č. 13 Průběh ohybového momentu po VK s reakcemi od závěsů - poryv

b) Kroutící moment po VK

Kroutící moment vypočteme stejně jako v případě manévru, tedy dle Schwedlerovy věty jako integrál ze spojitého zatížení a rameni po výškovém kormidle bez zavedenými závěsových sil.

$$M_{k_{vk}} = \int_0^{\frac{l_{vk}}{2}} q_{vk}(y) \cdot r(y) \cdot dy$$



Graf č. 14 Průběh kroutícího momentu po výškovém kormidle - poryv

3.6 Souhrn provozních zatížení VK

Poloha	Obratové zatížení od manévru			Poryvové zatížení		
y [m]	T [N]	M_o [N.m]	M_k [N.m]	T [N]	M_o [N.m]	M_k [N.m]
0	0	0	51,37	0	0	15,11
0,0125	5,69	-0,40	50,27	1,64	-0,13	14,78
0,02	9,11	-0,68	49,62	2,63	-0,22	14,59
0,03	13,67	-1,08	48,76	3,94	-0,34	14,33
0,04	18,22	-1,53	47,91	5,26	-0,48	14,08
0,04	-223,54	-1,53	47,91	-62,39	-0,48	14,08
0,045	-221,26	-0,56	47,49	-61,74	-0,20	13,95
0,05	-218,98	0,40	47,07	-61,08	0,07	13,83
0,1	-196,21	9,41	42,99	-54,51	2,65	12,61
0,2	-150,65	24,22	35,46	-41,36	6,89	10,37
0,3	-105,10	34,75	28,75	-28,22	9,91	8,37
0,4	-59,55	41,01	22,80	-15,07	11,71	6,61
0,5	-13,99	42,99	17,57	-1,92	12,28	5,08
0,525	-2,60	42,82	16,38	1,36	12,23	4,73
0,55	8,79	42,39	15,22	4,65	12,11	4,39
0,6	31,56	40,71	13,04	11,22	11,63	3,75
0,7	77,12	34,15	9,14	24,37	9,76	2,62
0,8	122,67	23,31	5,85	37,51	6,66	1,67
0,9	168,22	8,20	3,13	50,66	2,34	0,89
0,955	193,28	-1,93	1,85	57,89	-0,55	0,52
0,955	-43,28	-1,93	1,85	-12,49	-0,55	0,52
0,975	-34,17	-1,20	1,43	-9,86	-0,34	0,40
1	-22,78	-0,53	0,92	-6,57	-0,15	0,26
1,05	0	0	0	0	0	0

Tabulka č. 5 Souhrn vypočtených provozních zatížení výškového kormidla

Pro další výpočty budou uvažovány největší hodnoty z provozních zatížení výškového kormidla.

Maximální provozní zatížení VK			
Posouvající síla	T	$-223{,}54$	N
Ohybový moment	M_o	$42{,}99$	$N \cdot m$
Kroutící moment	M_k	$51{,}37$	$N \cdot m$

Tabulka č. 6 Maximální provozní zatížení výškového kormidla

4. Dimenzování základních konstrukčních prvků kormidla

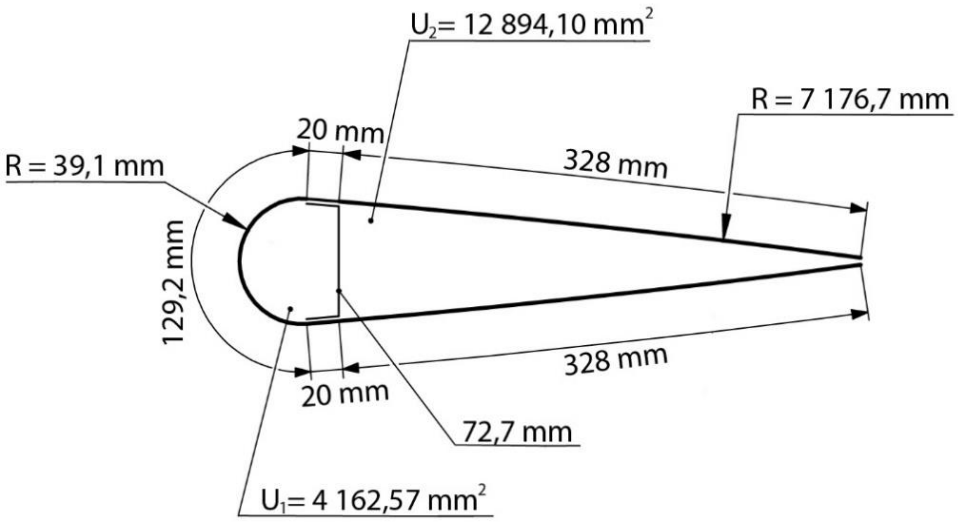
Všechny prvky výškového kormidla musí být dimenzovány tak, aby vydržely maximální hodnoty provozního zatížení běžně očekávaného v provozu a početní zatížení.

Početní zatížení se stanoví jako provozní zatížení násobené předepsaným součinitelem bezpečnosti, který udává předpis UL 2 – část I. V předpisu je udán součinitel bezpečnosti 1,5. Avšak pro konstrukci z kompozitních materiálů je ještě nutné tento součinitel rozšířit o součinitel vlhkosti 1,25.

Provozní zatížení musí být násobeno koeficientem bezpečnosti 1,875 na početní zatížení.

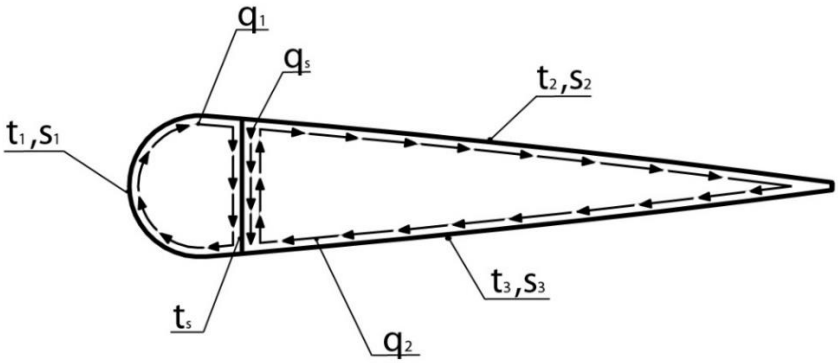
Početní zatížení VK			
Posouvající síla	T	$-419{,}14$	N
Ohybový moment	M_o	80,61	$N \cdot m$
Kroutící moment	M_k	89,78	$N \cdot m$

Tabulka č. 7 Početní zatížení výškového kormidla



Obrázek č. 9 Geometrická charakteristika kořenu výškového kormidla

4.1 Výpočet polohy elastické osy dvoudutinové konstrukce



Obrázek č. 10 Rozložení smykových toků v potahu výškového kormidla

Při bezkrutovém ohybu je pro dvoudutinovou konstrukci úloha staticky neurčitá druhého stupně, tedy konstrukci řešíme jako 2x staticky neurčitou. Proto je nutné k momentové podmínce rovnováhy přidat další dvě dodatečné deformační (přetvárné) podmínky.

Podmínka momentové rovnováhy

$$M_k = M_1 + M_2$$

udává, že součet jednotlivých přenášených momentů dutin musí být roven celkovému zatěžujícímu momentu.

Bretův vztah popisuje přenos kroutícího momentu

$$M_i = 2 \cdot U_i \cdot q_i$$

Dosazením Bretova vztahu do podmínky momentové rovnováhy dostaneme momentovou rovnováhu s výslednými smykovými toky

$$M_k = 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2$$

Dále se pro tyto smykové toky použijí dvě přetvárné podmínky.
První přetvárná podmínka vyjadřuje požadavek bezkrutového ohybu, při kterém se zkruty v obou dutinách musejí rovnat nule

$$\vartheta_1 = 0 \quad a \quad \vartheta_2 = 0$$

$$\vartheta_1 = \frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \oint_{①} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds = \frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \left[\frac{q_1 \cdot s_1}{G \cdot t_1} + \frac{(q_1 + q_s - q_2) \cdot h_s}{G \cdot t_s} \right] = 0$$

$$\vartheta_2 = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \oint_{②} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \left[\frac{q_2 \cdot s_{2H}}{G \cdot t_{2H}} + \frac{q_2 \cdot s_{2D}}{G \cdot t_{2D}} - \frac{(q_1 + q_s - q_2) \cdot h_s}{G \cdot t_s} \right] = 0$$

Druhá přetvárná podmínka vychází z úvahy, že zkrut první dutiny musí být stejný jako ve druhé dutině

$$\vartheta_1 = \vartheta_2$$

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \oint_{①} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \oint_{②} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds$$

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \left[\frac{q_1 \cdot s_1}{G \cdot t_1} + \frac{(q_1 + q_s - q_2) \cdot h_s}{G \cdot t_s}\right] = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \left[\frac{q_2 \cdot s_{2H}}{G \cdot t_{2H}} + \frac{q_2 \cdot s_{2D}}{G \cdot t_{2D}} - \frac{(q_1 + q_s - q_2) \cdot h_s}{G \cdot t_s}\right]$$

Pro výpočet dále uvažujeme, že

$$M_k = T_y \cdot x_c \quad a \quad q_s = \frac{T_y}{h_s}$$

Nyní jsou dány tři rovnice pro tři neznámé, dva smykové toky q_1, q_1 a polohu elastické osy x_c. Z druhé rovnice se vyjádří neznámá q_1 a dosadí se do první a třetí rovnice.

$$T_y \cdot x_c = 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2$$

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \left[\frac{q_1 \cdot s_1}{G \cdot t_1} + \frac{(q_1 + q_s - q_2) \cdot h_s}{G \cdot t_s}\right] = 0 \quad \Longrightarrow \quad q_1 = \frac{q_2 \cdot h_s - q_s \cdot h_s}{s_1 + h_s}$$

$$U_2 \cdot \left[\frac{q_1 \cdot s_1}{G \cdot t} + \frac{q_1 \cdot h_s}{G \cdot t} + \frac{q_s \cdot h_s}{G \cdot t} - \frac{q_2 \cdot h_s}{G \cdot t}\right] = U_1 \cdot \left[2 \cdot \frac{q_2 \cdot s_2}{G \cdot t} - \frac{q_1 \cdot h_s}{G \cdot t} - \frac{q_s \cdot h_s}{G \cdot t} + \frac{q_2 \cdot h_s}{G \cdot t}\right]$$

$$q_2 = \frac{2 \cdot h_s^2 \cdot q_s + h_s \cdot q_s}{2 \cdot s_1 \cdot s_2 + 2 \cdot s_2 \cdot h_s + s_1 \cdot h_s}$$

$$x_c = \frac{2 \cdot (U_1 \cdot h_s \cdot q_2 - U_1 \cdot h_s \cdot q_s + U_2 \cdot s_1 \cdot q_2 + U_2 \cdot h_s \cdot q_2)}{T_y \cdot (s_1 + h_s)}$$

Řešením jsou dvě rovnice pro dvě neznámé, z nichž se vyjádří hledaný elastický střed x_c.

$$x_c = \frac{2 \cdot [U_1 \cdot (2 \cdot h_s^3 + h_s^2 - 2 \cdot h_s^2 \cdot s_2 - 2 \cdot h_s \cdot s_1 \cdot s_2) + U_2 \cdot (2 \cdot h_s^3 + 2 \cdot h_s^2 \cdot s_1 + h_s^2 + s_1 \cdot h_s)]}{h_s \cdot [(s_1 + h_s) \cdot (2 \cdot s_1 \cdot s_2 + 2 \cdot s_2 \cdot h_s + s_1 \cdot h_s)]} =$$

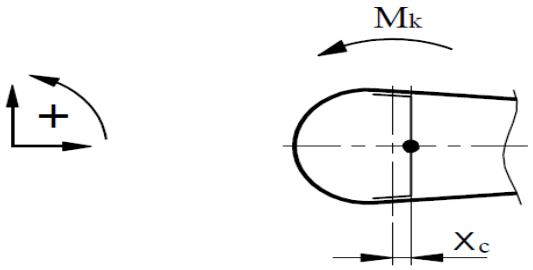
$$= \frac{2 \cdot [4\,162{,}57 \cdot (-11\,657\,005{,}9) + 12\,894{,}1 \cdot (2\,586\,154{,}2)]}{72{,}7 \cdot (41\,361\,813{,}4)} = -10{,}19\ mm$$

S ohledem na souměrnost tvaru výškového kormidla stačí určení polohy středu elastické osy ve směru tětivy profilu.

4.1.1 Kroutící moment k elastické ose

Pro další výpočty je nutný přepočet kroutícího momentu k elastické ose výškového kormidla.

$$M_{k_{EO}} = M_k + T \cdot x_c = 89\,780 + 419{,}14 \cdot 10{,}19 = 94\,052{,}47\ N.mm$$



Obrázek č. 11 Kroutící moment vzhledem k poloze elastické osy

4.2 Přerozdělení zatížení v konstrukci – smykové toky

Výsledné smykové toky jsou získány řešením dvoudutinové soustavy. Na rozdíl od určení elastické osy je soustava pouze 1x staticky neurčitá.

Pro výpočet je použita podmínka rovnováhy

$$M_{k_{EO}} = 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2$$

a jedna přetvárná podmínka udávající, že zkrut v jedné dutině se rovná zkrutu ve druhé dutině

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 \neq 0$$

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \oint_{①} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \oint_{②} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds$$

Je řešena soustava dvou rovnic pro dva neznámé smykové taky q_1 a q_2 .

$$M_{k_{EO}} = 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2 \quad \Longrightarrow \quad q_1 = \frac{M_{k_{EO}} - 2 \cdot U_2 \cdot q_2}{2 \cdot U_1}$$

$$U_2 \cdot \left[\frac{q_1 \cdot s_1}{G \cdot t} + \frac{q_1 \cdot h_s}{G \cdot t} + \frac{q_s \cdot h_s}{G \cdot t} - \frac{q_2 \cdot h_s}{G \cdot t}\right] = U_1 \cdot \left[2 \cdot \frac{q_2 \cdot s_2}{G \cdot t} - \frac{q_1 \cdot h_s}{G \cdot t} - \frac{q_s \cdot h_s}{G \cdot t} + \frac{q_2 \cdot h_s}{G \cdot t}\right]$$

$$q_2 = \frac{M_{k_{EO}} \cdot \left(s_1 + \frac{U_1}{U_2} \cdot h_s + h_s\right) + 2 \cdot U_2 \cdot q_s \cdot \left(\frac{U_1}{U_2} \cdot h_s + h_s\right)}{2 \cdot U_1 \cdot \left(2 \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot s_2 + \frac{U_1}{U_2} \cdot h_s + h_s\right) + 2 \cdot U_2 \cdot \left(s_1 + \frac{U_1}{U_2} \cdot h_s + h_s\right)}$$

Dosazením do vyjádřených rovnice získáme velikosti smykových toků v potahu

$$q_2 = \frac{94\,052{,}47 \cdot (256{,}34) - 148\,678 \cdot (96{,}17)}{8\,325{,}14 \cdot (307{,}94) + 25\,788{,}2 \cdot (256{,}35)} = 2{,}16\ N.mm$$

$$q_1 = \frac{94\,052{,}47 - 2 \cdot 12\,894{,}1 \cdot 2{,}16}{2 \cdot 4\,162{,}57} = 4{,}56\ N.mm$$

Z vypočtených hodnot je určen smykový tok ve stojině hlavního nosníku

$$q_{stojny} = q_1 + q_s - q_2 = 4{,}56 + \frac{(-419{,}14)}{72{,}7} - 2{,}16 = -3{,}33\ N.mm$$

4.3 Kontrola potahu

Potah bude prověřen v jeho největším průřezu, který tvoří nejvíce kritické místo potahu. Výpočet potahu je proveden dle pevnostních podkladů viz literatura [4].

a) Přední dutina

Napětí v potahu

$$\tau_{1_{pd}} = \frac{q_1}{t} = \frac{4{,}56}{0{,}4} = 11{,}5\ MPa$$

Kritické napětí

$$0 < \frac{b}{a} < 1 \quad \Longrightarrow \quad \frac{b}{a} = \frac{169{,}2}{1050} = 0{,}16$$

$$k_k = 3{,}62 \cdot \sqrt[4]{3{,}17 + 0{,}028 \cdot \frac{b^4}{r^2 \cdot t^2}} = 3{,}62 \cdot \sqrt[4]{3{,}17 + 0{,}028 \cdot \frac{169{,}2^4}{39{,}1^2 \cdot 0{,}4^2}} = 63{,}27$$

$$\tau_{kr_{pd}} = k_k \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 63{,}27 \cdot 61\,562 \cdot \left(\frac{0{,}4}{169{,}2}\right)^2 = 21{,}77\ MPa$$

Součinitel rezervy přední dutiny

$$\eta_{pd} = \frac{\tau_{kr_{pd}}}{\tau_{1_{pd}}} = \frac{21{,}77}{11{,}5} = 1{,}89 > 1$$

b) Zadní dutina

Zadní potah bude kontrolován jako rovinná deska díky svému velkému poloměru profilu, který se blíží přímce.

Napětí v potahu

$$\tau_{1_{zd}} = \frac{q_2}{t} = \frac{2{,}16}{0{,}4} = 5{,}41\ MPa$$

Kritické napětí

$$\frac{a}{b} = \frac{465}{328} = 1{,}4$$

a … šířka potahu mezi žebry $[mm]$

z grafu odečteno $K_s = 12{,}3$

$$\tau_{kr_{zd}} = 3 \cdot K_s \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 3 \cdot 12{,}3 \cdot 61\,562 \cdot \left(\frac{0{,}4}{328}\right)^2 = 3{,}38\ MPa$$

Součinitel rezervy zadní dutiny

$$\eta_{zd} = \frac{\tau_{kr_{zd}}}{\tau_{2_{zd}}} = \frac{3{,}38}{5{,}41} = 0{,}65 < 1$$

4.4 Návrh pásnic a stojiny

Napětí v pásnicích lze vyjádřit jako tahové a tlakové napětí od sil, které vytvoří silovou dvojici s ramenem rovným vzdálenosti obou těžišť pásnic h_s. Výpočet je proveden viz literatura [5].

Ohyb

$$\sigma(y) = \frac{M_o}{J_x} \cdot y$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_o}{J_x} \cdot \frac{h}{2} \;\Rightarrow\; J_x = \frac{M_o}{\sigma_{max}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{80\,610}{509} \cdot \frac{72{,}7}{2} = 10\,793{,}86\ mm^2$$

U leteckého nosníku předpokládáme, že $J_{x_{stojny}} \ll J_{x_{pásnice}} \;\Rightarrow\; J_x \cong J_{x_{pásnice}}$

$h \cong h_s$

A dále, že bude souměrný průřez $A_h = A_d = A_p$

$$J_x = h_s^2 \cdot \frac{A_h \cdot A_d}{A_h + A_d} = \frac{1}{2} \cdot h_s^2 \cdot A_p \quad \Longrightarrow \quad A_p = \frac{2 \cdot J_x}{h_s^2} = \frac{2 \cdot 10\,793{,}86}{72{,}7^2} = 4{,}08\ mm^2$$

$$t_{min} \geq \frac{A_p}{a} = \frac{4{,}08}{20} = 0{,}21\ mm$$

Pásnice i stojina jsou vyrobeny v Prepregu o tloušťce jedné vrstvy $0{,}2\ mm$. Musí být použity dvě vrstvy, aby byla splněna podmínka

$$t > t_{min}$$

$$2 \cdot 0{,}2 > 0{,}21$$

a) Navržené rozměry pásnic

Šířka pásnice je zvolena $20\ mm$ z důvodu geometrie potahu výškového kormidla.

Pásnice (horní, dolní)			
Průřez	A_p	8	mm^2
Šířka	a	20	mm
Tloušťka	t	0,4	mm

b) Navržené rozměry stojiny

Stojina			
Průřez	A_p	29,1	mm^2
Výška	h_s	72,7	mm
Tloušťka	t	0,4	mm

4.4.1 Kontrola pásnic nosníku

Osová síla v pásnici

$$\sigma = \frac{N_p}{A_p} \implies N_p = \sigma \cdot A_p = \frac{M_o}{h_e} = \frac{80\,610}{72{,}7} = 1\,108{,}8\ N$$

a) Horní pásnice

Jedná se o tzv. tlakovou pásnici a bude provedena kontrola na tlak.

Hodnota kritického napětí v tlaku pro použitý materiál

$$\sigma_{kr} = 900\ MPa$$

Součinitel rezervy horní pásnice

$$\eta_{ph} = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma} = \frac{\sigma_{kr}}{\frac{N_p}{A_p}} = \frac{900}{\frac{1\,108{,}8}{8}} = 6{,}49 > 1$$

b) Spodní pásnice

Jedná se o tzv. tahovou pásnici a bude provedena kontrolována na tah.

$$\sigma_t = \frac{N_{pd}}{S_{ps}} = \frac{1\,108{,}8}{8} = 138{,}6\ MPa$$

Součinitel rezervy spodní pásnice

$$\eta_{pd} = \frac{R_m}{\sigma_t} = \frac{1\,700}{138{,}6} = 12{,}27 > 1$$

4.4.2 Kontrola stojiny

Bude provedena kontrola stojiny jako tenké desky na ztrátu stability.

$$\frac{a}{b} = \frac{950}{72{,}7} = 13{,}06$$

Z grafu odečteno $K_s = 9$

Kritické napětí

$$\tau_{kr} = 0{,}9 \cdot K_S \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 0{,}9 \cdot 9 \cdot 61\,562 \cdot \left(\frac{0{,}4}{72{,}7}\right)^2 = 15{,}1\ MPa$$

Smykové napětí ve stojině

$$\tau = \frac{q_{stojiny}}{t} = \frac{|-3{,}33|}{0{,}4} = 8{,}33\ MPa$$

Součinitel rezervy stojiny

$$\eta_{stojiny} = \frac{\tau_{kr}}{\tau} = \frac{15{,}1}{8{,}33} = 1{,}81\ > 1$$

4.5 Souhrn vypočtených rezerv výškového kormidla

Prvek konstrukce VK		Součinitel rezervy $\eta\ [-]$
Pásnice nosníku	Tlaková	6,49
	Tahová	12,27
Stojina	Ztráta stability	1,81
Potah	Přední dutina	1,89
	Zadní dutina	0,63

Tabulka č. 8 Souhrn vypočtených součinitelů rezerv výškového kormidla

Součinitelé rezerv v případě stojiny a pásnic jsou dostatečné a u nosníku není ve výpočtu dále zahrnuta vrstva lepení a potahu, která následně zvýší pevnost celé konstrukce. Součinitel rezervy bude mnohem vyšší, než je vypočteno.

V případě zadní dutiny by došlo ke ztrátě stability, proto je nutné mezi žebry využít k vyztužení potahu pěny Rohacel 51A o tloušťce 3 mm, a tím zvýšit pevnost potahu.

5. Hmotový rozbor navrženého výškového kormidla

Pro navržené VK letounu musí být proveden hmotový rozbor. Hmotnosti jednotlivých dílů a polohy jejich těžiště byly odečteny z jejich 3D modelů v programu Solidworks.

5.1 Hmotnost prvků

Prvky výškového kormidla jsou vyrobeny z Prepregu o tloušťce jedné vrstvy 0,2 mm. Jedná se o polotovary k výrobě vláknových kompozitních výrobků s výbornými mechanickými vlastnostmi. Hlavní složkou prepregů je předimpregnovaná výztuž částečně vytvrzená pryskyřicemi.

5.1.1 Hlavní nosník

Vrstva	Tloušťka $t\ [mm]$	Plocha		Hustota $\rho\ [g/m^2]$	Hmotnost $m\ [g]$
		$S\ [mm^2]$	$S\ [m^2]$		
1. vrstva	0,2	96 267	0,096267	320	30,8
2. vrstva	0,2	97 858	0,097858	320	31,3
Celkem					62,1

5.1.2 Potah

Vrstva	Tloušťka $t\ [mm]$	Plocha		Hustota $\rho\ [g/m^2]$	Hmotnost $m\ [g]$
		$S\ [mm^2]$	$S\ [m^2]$		
1. vrstva	0,2	692 989	0,692989	320	221,7
2. vrstva	0,2	713 686	0,713686	320	228,4
Celkem					450,1

5.1.3 Žebra

a) Kořenové žebro:

Vrstva	Tloušťka $t\ [mm]$	Plocha		Hustota $\rho\ [g/m^2]$	Hmotnost $m\ [g]$
		$S\ [mm^2]$	$S\ [m^2]$		
1. vrstva	0,2	33 531	0,033531	320	10,7
2. vrstva	0,2	34 311	0,034311	320	11
Celkem					21,7

b) Středové žebro:

Vrstva	Tloušťka $t\ [mm]$	Plocha		Hustota $\rho\ [g/m^2]$	Hmotnost $m\ [g]$
		$S\ [mm^2]$	$S\ [m^2]$		
1. vrstva	0,2	16 429	0,016429	320	5,2
2. vrstva	0,2	16 814	0,016814	320	5,4
Celkem					10,6

c) Koncové žebro:

Vrstva	Tloušťka $t\ [mm]$	Plocha		Hustota $\rho\ [g/m^2]$	Hmotnost $m\ [g]$
		$S\ [mm^2]$	$S\ [m^2]$		
1. vrstva	0,2	15 314	0,015314	320	4,9
2. vrstva	0,2	15 633	0,015633	320	5
Celkem					9,9

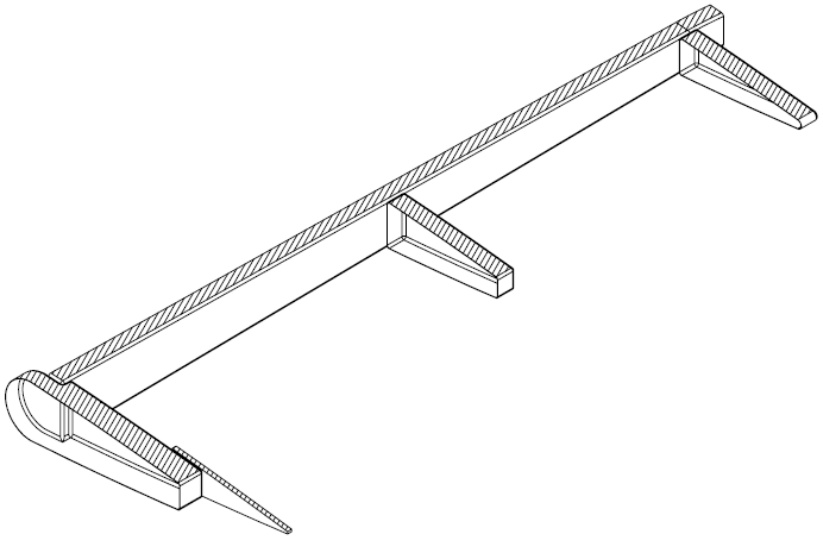
d) Obrysová výztuha:

Materiál	Tloušťka $t\ [mm]$	Plocha		Hustota $\rho\ [kg/m^3]$	Hmotnost $m\ [g]$
		$S\ [mm^3]$	$S\ [m^3]$		
Překližka	6	24 463	$24{,}463 \cdot 10^{-5}$	620	151,7

5.1.4 Lepené spoje

Jednotlivé díly výškového kormidla jsou k sobě lepeny. Vrstva použitého lepidla se uvažuje 0,6 mm a objemová hustota použitého lepidla je $1350\ kg/m^3$. Hmotnost lepených spojů bude tvořit převážnou část hmotnosti celého výškového kormidla.

Materiál	Objem		Hustota $\rho\ [kg/m^3]$	Hmotnost $m\ [g]$
	$V\ [mm^3]$	$V\ [m^3]$		
Epoxidové lepidlo	44 235	$44{,}235 \cdot 10^{-5}$	1350	597



Obrázek č. 12 Schéma navržené konstrukce VK s vyšrafovanými plochami k lepení

5.2 Polohy těžiště

Prvek výškového kormidla	Poloha těžiště		
	x_t $[mm]$	y_t $[mm]$	z_t $[mm]$
Hlavní nosník	15,6	455,9	0
Žebro - kořenové	83,6	0,45	0
Žebro - středové	73,66	7,14	0
Žebro - koncové	77,53	8,43	0
Potah	26,7	595	0
Obrysová výztuha	61	3	0

Součásti jsou navrženy symetricky, tudíž je jejich souřadnice $z_t = 0$ a těžiště je na ose.

5.3 Souhrn hmotového rozboru letounu

V souhrnu je určena celková hmotnost a poloha těžiště navrženého výškového kormidla.

Součást		m $[g]$	x_t $[mm]$	y_t $[mm]$
Výškové kormidlo	Hlavni nosník	62,1	15,6	455,9
	Žebro - kořenové	21,7	83,6	0,45
	Žebro - středové	10,6	73,66	7,14
	Žebro - koncové	9,9	77,53	8,43
	Potah	450,1	26,7	595
	Obrysová výztuha	151,7	61	3
	Lepené spoje	597	-	-
Celkově		1 303,1	123,1	512,46

Tabulka č. 9 Souhrn hmotností a těžišť dílů výškového kormidla

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat konstrukční návrh výškového kormidla řešeného jako dvoudutinovou konstrukci s ohledem na danou geometrii potahu, požadavky stanovené předpisem UL 2 a dostupné znalosti v oblasti letecké techniky. Konstrukční návrh výškového kormidla byl zpracován pro ultralehký letoun řízený aerodynamicky. V práci byly provedeny výpočty zatížení výškového kormidla, navrženy a následně dimenzovány základní konstrukční prvky.

Na základě zadaných parametrů letounu byla sestavena výsledná letová obálka, ze které byly odečteny kritické body obálky. Hodnoty těchto bodů byly použity pro výpočty vyvažovacího, obratového a poryvového zatížení. Na základě těchto výpočtů bylo stanoveno maximální provozní zatížení výškového kormidla. Maximální provozní zatížení bylo přepočteno na početní zatížení, které bylo použito pro výpočet polohy elastické osy, přerozdělení smykových toků a k návrhu jednotlivých konstrukčních prvků výškového kormidla.

Při pevnostní kontrole ukázal nízký součinitel rezervy u zadní dutiny potahu nebezpečí ztráty stability a jeho zvlnění. Možným řešením problému je vyztužení potahu a tím jeho celkové zpevnění. Součinitele rezervy u ostatních konstrukčních prvků byly dostačující.

V závěru byl proveden hmotový rozbor jednotlivých navržených prvků pro stanovení celkové hmotnosti výškového kormidla a polohy jeho těžiště.

Seznam použité literatury

[1] MIKULA, J.: Konstrukce a projektování letadel II, ČVUT v Praze, 2005

[2] ŠPUNDA, J.: Požadavky pro dosažení letové způsobilosti podle pevnostních předpisů a výpočet zatížení letounu a jeho částí, skripta VAAZ, 1961

[3] ŠPNDA, J.: Pevnost leteckých konstrukcí: Nosná soustava – křídlo letounu, skripta VAAZ, 1955

[4] FUNKE, H.: Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges, 2001. Dostupné z: http://www.r-g.de

[5] SLAVÍK, S.: Stavba letadel, ČVUT v Praze, 1997

[6] Stavební předpis UL 2 – část I., LAA ČR, Dostupné z: http://www.laacr.cz/Stranky/Predpisy/default.aspx

Příloha

Výchozí parametry letounu pro návrh výškového kormidla

Vstupní hodnoty			
Parametr:	Vstupní hodnoty:		
	Označení	Hodnota	Jednotky
Hmotnost	m_{MTOW}	472,5	kg
Hmotnost VOP	m_{VOP}	8,9	kg
Plocha křídla	S	8,8	m^2
Plocha VOP	S_{VOP}	1,971	m^2
Rozpětí VOP	l_{VOP}	2,7	m
Rameno VOP	L_{VOP}	3,44	m
Hloubka kořenového profilu	b_{0STAB}	0,504	m
Hloubka koncového profilu	b_{kSTAB}	0,266	m
Hloubka kořenového profilu VOP	b_{0VOP}	0,858	m
Hloubka koncového profilu VOP	b_{kVOP}	0,5	m
Sklon vztlakové čáry	a	4,645	$1/rad$
Střední aerodynamická tětiva - křídlo	c_{SAT}	1,306	
Střední aerodynamická tětiva - VOP	$c_{SAT_{VOP}}$	0,754	
Maximální součinitel vztlaku křídla	$c_{L_{max}}$	1,5246	
Maximální součinitel vztlaku křídla s vysunutou klapkou	$c_{L_{klap}}$	2,594	
Minimální součinitel vztlaku křídla	$c_{L_{min}}$	0,8	
Součinitel klopivého momentu	c_m	$-0,099$	
Součinitel klopivého momentu VOP	$c_{m_{VOP}}$	$-0,43$	
Maximální kladný násobek		4	
Maximální záporný násobek		-2	

Konstanty			
Parametr:	Vstupní hodnoty:		
	Označení	Hodnota	Jednotky
Hustota vzduchu v 0 m MSA	ρ_0	1,225	kg/m^3
Gravitační zrychlení	g	9,81	m/s^2
Rychlost poryvu pro V_C	U	15	m/s
Rychlost poryv pro V_D	U	7,5	m/s^2